

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Studijní program B2341 – Strojírenství

Strojírenská technologie

Zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Zjišťování modulu pružnosti pevnostních plechů

Determination of Yang`s modulus for high – strength metal sheets

Stanislav Šimáček

KSP – TP – B9

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Ing. Mirko Král, CSc.

Konzultant bakalářské práce: Ing. Pavel Doubek

Rozsah práce a příloh:

Počet stran 39

Počet tabulek 11

Počet příloh 06

Počet obrázků 14

Datum: 26.5.2006

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Studijní program: B2341 – Strojírenství
Diplomant: Stanislav Šimáček
Téma práce: Zjišťování modulu pružnosti pevnostních plechů
Determination of Yang`s modulus for high – strength metal sheets

Číslo BP: KSP – TP – B9
Vedoucí BP: Doc. Ing. Mirko Král, CSc.
Konzultant BP: Ing. Pavel Doubek

Abstrakt: S rostoucím uplatněním pevnostních plechů je nutné neustále doplňovat materiálová data těchto materiálů. Cílem bakalářské práce je zjištění modulu pružnosti u vybraných plechů z pevnostních materiálů. U konkrétních vybraných materiálů RA-K 40/70, CP-W 800 a MS-W 1200 bylo provedeno experimentální určení a vyhodnocení modulu pružnosti v tahu pomocí statické zkoušky v tahu a v ohybu.

Abstract: With all the time growing applications of high-strength metal sheets, knowledge of their material data becomes more and more important and needs to be continuously updated. Main objective of this bachelor diploma thesis is determination of Yang`s modulus for selected metal sheets made of high-strength materials. For particularly selected materials, namely of RA-K 40/70, CP-W, and MS-W types, experimental determination and evaluation of Yang`s modulus has been performed by means of static tensile and bending tests.

Místopřísežné prohlášení:

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vykonal samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, dne 26. května 2006

.....

Stanislav Šimáček
Na Radouči 1254
293 01 Mladá Boleslav

Poděkování:

V úvodu bych chtěl poděkovat mému vedoucímu bakalářské práce Doc. Ing. Mirko Královi, CSc. a konzultantovi Ing. Pavlovi Doubkovi za jejich odborné vedení, rady a věcné připomínky, díky kterým jsem se mohl lépe orientovat v celé problematice při vypracování předkládané bakalářské práce.

Dále touto cestou chci poděkovat Prof. Ing. Jaroslavovi Zelenému, CSc za pomoc překladu technických výrazů z anglických textů.



OBSAH

1	Úvod [1,2]	8
2	Trendy vývoje plechů používaných pro stavbu karoserie	9
2.1	Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem	9
2.2	Plechý z IF ocelí bez intersticií (Interstitials Free Steels).....	11
2.3	Plechý z IF ocelí s BH efektem.....	11
2.4	Vysokopevnostní ocele (High – Strenght Steels).....	13
2.4.1	Plechý z DP ocelí (Dual Phase Steels – dvoufázové ocele).....	13
2.4.2	Plechý z ocelí s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP ocele).....	14
2.4.3	Plechý z CP ocelí (Complex Phase Steels – vícefázové ocele)	14
2.4.4	MS ocele (Martenzitické ocele)	15
2.4.5	Termomechanicky zpracované nízkolegované ocele.....	15
3	Základní vlastnosti kovů a jejich zkoušení [5,6].....	17
3.1	Zkoušení kovů.....	17
3.1.1	Zkouška tahem (ČSN EN 100002-1)	18
3.1.2	Zkouška ohybem	21
3.2	Modul pružnosti [7]	23
3.2.1	Statické určování modulu pružnosti.....	23
3.2.1.1	Stanovení modulu pružnosti v tahu přímou metodou [8]	23
3.2.1.2	Stanovení modulu pružnosti v tahu z průhybu tyče [9]	24
3.2.1.3	Stanovení modulu pružnosti ve smyku – torzní metoda [10]	25
3.2.2	Dynamické určování modulu pružnosti	25
3.2.2.1	Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzních kmitů [9] ...	26
4	Experimentální část.....	27
4.1	Vybrané materiály a jejich charakteristiky	27
4.1.1	Materiál RA-K 40/70	27
4.1.2	Materiál CP-W 800	27
4.1.3	Materiál MS-W 1200	28
4.2	Měření mechanických vlastností materiálů.....	29
4.2.1	Statická zkouška tahem	29
4.2.2	Výsledky statické zkoušky tahem	30
4.2.3	Dílčí závěr	31
4.3	Určování modulu pružnosti.....	31
4.3.1	Zkouška tahem	31
4.3.1.1	Popis měření.....	31
4.3.1.2	Vyhodnocení	32
4.3.2	Zkouška ohybem	33
4.3.2.1	Popis měření.....	33
4.3.2.2	Vyhodnocení	34
5	ZÁVĚR	36
6	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	38
7	SEZNAM PŘÍLOH	39

**Seznam použitých značek, veličin a jednotek:**

Označení	Název	Jednotka
A_{50}, A_{80}	tažnost	[%]
b	šířka materiálu	[mm]
BH	Bake Hardening	[-]
d	průměr	[mm]
E	Youngův modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	síla	[N]
G	Youngův modul pružnosti ve smyku	[MPa]
h	tloušťka materiálu	[mm]
IT	index tváritelnosti	[-]
J	moment setrvačnosti	[m ⁴]
KUT	kompletní ukazatel tváritelnosti	[-]
l_p	rozpětí podpěry	[mm]
L_0	počáteční délka	[mm]
L_u	konečná délka	[mm]
m	hmotnost	[kg]
M_k	kroučící moment	[Nm]
NbCN	karbonitrid niobu	[-]
r	poloměr	[mm]
R	smluvní napětí	[MPa]
R_e	mez kluzu	[MPa]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
$R_{p0,2}$	smluvní mez kluzu	[MPa]
R_u	mez úměrnosti	[MPa]
S_0	počáteční plocha příčného průřezu	[mm ²]
S_u	průřez tyče v místě přetržení	[mm ²]
TiCN	karbonitrid titanu	[-]
W_0	průřezový modul v ohybu	[m ³]
y	průhyb	[mm]
Z	kontrakce	[%]
ΔL	změna délky	[mm]
ε	poměrné prodloužení	[-]
σ	normálové napětí	[MPa]

1 Úvod [1,2]

V současné době rostoucích nároků celosvětového průmyslu, dochází ke značnému vývoji nových materiálů. Použití těchto materiálů ve výrobě umožnilo realizaci nových koncepcí vyráběných zařízení a jejich součástí. Nejvýznamnějším výrobcem v současné době je u nás automobilový průmysl, který určuje tempo hospodářského růstu. Výrobci automobilů hledají stále nová a lepší řešení stavby osobních automobilů s ohledem na zvyšující se požadavky ohledně ekologické zátěže prostředí, snižování spotřeby pohonných hmot a zvyšování bezpečnosti pasažérů. Ocelové hlubokotažné plechy s přijatelnými pevnostními vlastnostmi umožnily konstrukci tzv. samonosné karoserie, která je schopna splňovat mnohdy protikladné požadavky automobilového průmyslu. Podle požadavků automobilových vývojářů je ocel s vysokým modulem pružnosti ideálním materiálem pro velmi tuhý podlahový panel[1]. Hlavním cílem všech světových výrobců automobilů je snižování hmotnosti vozidel. Proto během posledních let našly uplatnění slitiny hliníku, hořčíku, polymery, kompozity vyztužené uhlíkovými vlákny aj. jako konstrukční materiály pro výrobu osobních automobilů. Přes všechny výjimečné vlastnosti těchto materiálů se však ve větší míře nedokázaly prosadit oproti již používaným ocelím.

V případě použití plechů z materiálů s vyššími pevnostními vlastnostmi, které zaručí dostatečnou tuhost a bezpečnost celého vozu je možné očekávat snížení hmotnosti automobilu až o 40%. Zvýšení pevnostních charakteristik má sice za následek snížení tvářitelnosti, což omezuje tvarovou variabilitu a tím i použití plechů z materiálů s vysokou pevností, ale přesto se jeví použití plechů z vysokopevnostních materiálů pro řadu automobilových dílců výhodné a z hlediska váhových úspor i zdokonalení jízdních vlastností jako perspektivní.

2 Trendy vývoje plechů používaných pro stavbu karoserie

V následujících odstavcích jsou charakterizovány základní vlastnosti ocelí, které se používají na výrobu karosářských plechů[2, 3, 4].

2.1 Hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem

Tenké za studena válcované plechy z ocelí uklidněných hliníkem byly až do nedávna rozhodujícím materiálem pro stavbu karoserie vozidel. Jejich výborná tvářitelnost je předurčila k možnosti vylisování složitých tvarů zejména povrchových dílů, kde jsou nejen kladeny vysoké nároky na mechanické vlastnosti karoserie, ale také nároky na čistotu a mikrogeometrii.

Nejnovější vývoj ve světovém automobilovém průmyslu si vynutil přesnou specifikaci vlastností těchto ocelí a to především z důvodů globalizace konstrukce a výroby motorových vozidel a využívání CAD a CAFA (Computer Aided Forming Analysis). Aby tyto metody byly efektivní, vyžadují pro počítačové zpracování dostatečně přesné mechanické vlastnosti už v počátečním stádiu návrhu. Z tohoto důvodu Asociace automobilových inženýrů SAE (Society of Automotive Engineers) vydala v roce 1997 specifikaci J2329 pod názvem „Kategorie a vlastnosti nízkouhlíkových automobilových ocelových plechů“, které jsou uvedeny v tab. 2.1.

Tuto kategorii ocelových plechů reprezentují ocele VSŽ z řady KOHAL. Jejich vlastnosti a ekvivalenty podle jiných mezinárodních norem jsou uvedeny v tab. 2.2.

V závislosti na chemickém složení, mechanických vlastnostech a způsobu výroby byly hlubokotažné plechy rozděleny do několika kvalitativních skupin :

- a) CQ - plechy běžné kvality (Commercial Quality)
- b) DQ - tažné plechy (Drawing Quality)
- c) DDQ - hlubokotažné plechy (Deep Drawing Quality)
- d) EDDQ - zvlášť hlubokotažné plechy (Extra Deep Drawing Quality)
- e) EDDQ – S - super hlubokotažné (Extra Deep Drawing Quality – Super)



Kompletní vlastnosti těchto tažných ocelí z hlediska jejich vhodnosti k tažnosti je uvedeno v tab. 2.3.

Tab. 2.1 Mechanické vlastnosti za studena válcovaných plechů dle normy SAE J2329

Označení	Mez kluzu	Minimální pevnost	Tažnost A_{50}	r_m	n
SAE J2329	$R_p 0,2$ (MPa)	(MPa)	(%)	minimum	minimum
Stupeň 1	nespecifikováno	nespecifikováno	nespecifikováno	nespecifikováno	nespecifikováno
Stupeň 2	140 - 260	240	34	nespecifikováno	0,16
Stupeň 3	140 - 205	240	38	1,5	0,18
Stupeň 4	140 - 185	240	40	1,6	0,20
Stupeň 5	110 - 170	240	42	1,7	0,22

Tab. 2.2 Za studena válcované plechy řady KOHAL

Označení jakosti	Mechanické vlastnosti						
	$R_p 0,2$ min.	$R_p 0,2$ max.	R_m	A_{80} min.	Ohyb o 180° Ø trnu	r_{90} min.	n_{90} min.
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(%)			
KOHAL 180	140	180	270 - 330	40	0 a	1,9	0,200
KOHAL 200	140	200	270 - 350	38	0 a	1,6	0,180
KOHAL 240	140	240	270 - 370	34	0 a	1,3	
KOHAL 280	140	280	270 - 410	28	0 a		

Tab. 2.3 Charakteristické vlastnosti tažných ocelí z hlediska vhodnosti k tažnosti

Skupina	R_e (MPa)	A_{80} (%)	r	n	P	KUT	IT
CQ	240 - 260	26 - 30	1,0 - 1,2	0,14 - 0,16	1,2 - 1,3	30 - 40	< 200
DQ	220 - 240	30 - 36	1,2 - 1,4	0,16 - 0,18	1,3 - 1,4	40 - 50	200 - 250
DDQ	200 - 220	36 - 38	1,4 - 1,6	0,18 - 0,20	1,4 - 1,5	50 - 57	250 - 320
EDDQ	180 - 200	38 - 40	1,6 - 1,8	0,20 - 0,22	1,5 - 1,67	57 - 67	320 - 400
EDDQ - S	< 180	> 40	> 1,8	> 0,22	> 1,67	> 67	> 400

[3]



$$P = R_m / R_c \Rightarrow \text{znamená poměr pevnosti a meze kluzu} \quad (2.1)$$

$$KUT = P.A_{80} \Rightarrow \text{je komplexní ukazatel tvářitelnosti} \quad (2.2)$$

$$IT = r.n.100 \Rightarrow \text{je index tvářitelnosti} \quad (2.3)$$

Pro dosažení vyšší pevnosti se tyto ocele:

- 1) legují fosforem (P) – tzv. refosforizované ocele
- 2) mikrolegují Mn, Si, Al, V, Ti apod. – tzv. mikrolegované ocele

V důsledku složitých teplotních procesů v pozinkování lince podléhají žárově pozinkované hlubokotažné plechy z ocelí uklidněných hliníkem stárnutí a tím změnám mechanických vlastností. Tyto druhy ocelí nejsou schopny dosáhnout vyššího stupně tvářitelnosti než doporučuje skupina DDQ. Proto byly vyvinuty oceli bez tzv. IF ocele (tj. bez intersticií).

2.2 Plechy z IF oceli bez intersticií (Interstitials Free Steels)

IF ocele obsahují velmi nízké množství intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku. Nízký obsah těchto chemických prvků zaručuje výbornou tvářitelnost, ale poměrně nízkou pevnost. Jestliže se IF ocel mikroleguje Ti nebo Nb dojde ke vzniku karbidu legur (TiCN, NbCN). Tím dojde k zvýšení pevnosti při zachování dobré plastičnosti. Tzn., že plechy z IF oceli mají po válcování za studena vynikající hodnoty tvářitelnosti a mechanické vlastnosti. Zaručují téměř odolnost materiálu proti stárnutí při žárovém pozinkování nebo kontinuálním žiháním.

Plechy z IF ocelí se používají na výrobu tvarově složitých dílů jako jsou blatníky, kryty dveří apod. Hlavními výrobci plechů z IF ocelí jsou firmy: Salzgitter GmbH, Arcelor S.A. Group a Voest.

2.3 Plechy z IF ocelí s BH efektem

Plechy z klasických IF ocelí mají nevýraznou mez kluzu a tím jsou výhodné z pohledu tvářitelnosti, ale jejich nevýhodu vidíme především v nízké odolnosti vůči



vtlačení. Na eliminování tohoto efektu byly vyvinuty IF ocele vykazující BH (Bake Hardening) efekt.

BH efekt je jev, který spočívá ve zvýšení meze kluzu při teplotě vypalování laku karoserie při 170° C po dobu 20 min.. Velikost BH efektu je z hlediska chemického složení závislá na obsahu C, Mn, a S. Dále závisí na způsobu tváření (válcování) za studena a na parametrech rekrystalizačního žíhání.

V důsledku BH efektu je možné zvýšit mez kluzu o 40 – 70 MPa a tím zlepšit odolnost vůči vtlačení jako např. u kapoty motorů, vnějších dveří, střechy apod. Z hlediska BH efektu známe dva základní typy ocelí pro výrobu plechů, a to se zvýšeným obsahem C a se zvýšeným obsahem Ti, nebo Nb.

1) *se zvýšeným obsahem C*

V tomto případě je přídavek Ti a Nb do ocele nižší, aby určitá část C zůstala v tuhém roztoku i po válcování za tepla. BH efektu je možno potom dosáhnout i při nižších žíhacích teplotách. U těchto typů ocelí nelze dosáhnout vysoké hlubokotažnosti plechu, protože v tuhém roztoku existuje určité množství nevázaného uhlíku. To má za následek nižší koeficient normálové anizotropie r , než konvenční plechy i IF ocelí.

2) *se zvýšeným obsahem Ti resp. Nb*

U tohoto typu ocelí se vyskytuje vynikající hlubokotažnost plechu, protože při tváření se intersticiální uhlík v tuhém roztoku prakticky nevyskytuje. Vyžadují však vysoké žíhací teploty. Uhlík potřebný pro BH efekt se získá rozpuštěním karbonitridických precipitátů při vysokoteplotním žíhání na kontinuální žíhací lince a následným rychlým ochlazením. BH efekt je tím větší, čím vyšší je žíhací teplota a následná rychlost ochlazení. Ve srovnání s ocelmi s vyšším obsahem uhlíku je z hlediska výroby i použití energeticky nákladnější.

IF oceli s BH efektem se převážně používají na výrobu vnějších dílů karoserie např. střecha, víko kufru, kapota apod.

Nejnovější trendy ve vývoji IF ocelí jsou především orientované na snížení nákladů, zlepšení tvářitelnosti, výrobu pevnostních tvářitelných ocelí.



2.4 Vysokopevnostní ocele (High – Strenght Steels)

Tyto ocele se vyznačují vysokou pevností a dobrou tvářitelností a proto jsou ideálním materiálem pro automobilový průmysl.

Použití plechů z vysokopevnostních ocelí pro stavbu osobních automobilů je dáno snahou snižovat hmotnost karoserie redukcí tloušťky používaných plechů: čím lehčí je karoserie, tím je nižší spotřeba pohonných hmot a nižší emise. Např. každá redukce váhy automobilu o 100 kg se rovná snížení spotřeby pohonných hmot o 0,7 litrů na 100 km[4].

Aby se splnily výše uvedené požadavky byly vyvinuty vysokopevné IF ocele s odstupňovanou mezí kluzu 340 – 420 MPa. Při vývoji vysokopevnostních plechů se v různých kombinacích využívají všechny mechanismy zpevnění a to zpevnění tuhého roztoku, precipitační, deformační a transformační.

U ocelí s pevností pod 500 MPa, které jsou zpevněné tuhým roztokem mají nejlepší vyváženost pevnosti a tažnosti. Výrazný nárůst použití zaznamenávají vysokomanganované.

IF ocele typu Mn – Nb – Ti. Do této skupiny lze zařadit i za studena válcované plechy z IZ – izotropních ocelí vyvinutých začátkem 90 let firmou PREUSSANG. Tyto ocele se proti plechům z mikrolegovaných a BH ocelí vyznačují vyšší hodnotou tažnosti a exponentem deformačního zpevnění n . Mezi vysokopevnostní ocele řadíme DP ocele, TRIP ocele, CP ocele, MS ocele a termomechanicky zpracované nízkolegované ocele, které jsou uvedeny v následujících odstavcích.

2.4.1 Plechy z DP ocelí (Dual Phase Steels – dvoufázové ocele)

Tyto ocele v dnešní době staly nejpopulárnějším materiálem v automobilovém průmyslu. Jedná se o nízkouhlíkové ocele na bázi Mn – Si se strukturou tvořenou feritickou maticí, ve které se nacházejí malé ostrůvky martenzitu. Ferit v této struktuře tvoří jemnou fázi a martenzit tvrdou fázi. Struktura DP ocelí, která je na obr.2.1 jím zaručuje pevnost 500 – 600 MPa a velmi dobrou tvářitelnost za studena. Obsah martenzitu může být v rozmezí (10 – 25) %. Zatím co u vysokopevnostních mikrolegovaných ocelí mez kluzu může vzrůst až na 90 % pevnosti, tak u DP ocelí tato hodnota nedosahuje ani 70 %. Tato skutečnost ulehčuje tvářecí proces. Typické použití dvoufázových ocelí je pro výrobu disků kol.

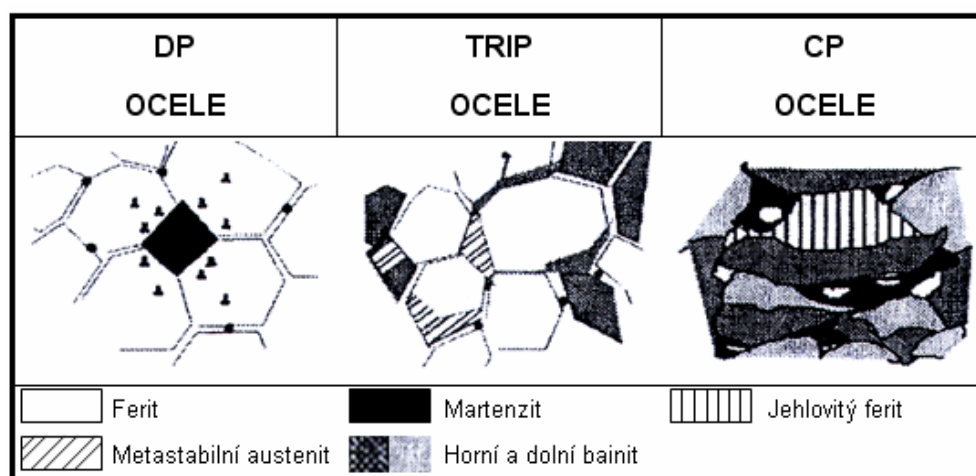
2.4.2 Plechy z ocelí s transformačně indukovanou plasticitou (TRIP ocele)

TRIP (transformation induced plasticity) jsou ocele legované Mn a Si, které se po válcování prudce ochladí na vzduchu o poté vhodně tepelně zpracují. Strukturu těchto ocelí tvoří ferit a bainit s ostrůvky zvýšeného nepřeměnného austenitu, který transformuje na tvrdý martenzit až během následné deformace při tváření. TRIP ocele je možné vyrobit válcováním za studena. Po tváření dosahují tyto ocele až 750 MPa a tažnosti nad 28 % což je předurčuje na nejnáročnější součásti v automobilovém průmyslu. Protože se vyznačují vysokou tažností a vysokou kapacitou deformačního zpevnění, využívají se na ty součásti karoserie, které zlepšují parametry bariérových zkoušek (Crash testu). Struktura TRIP ocelí je znázorněna na obr. 2.1.

2.4.3 Plechy z CP ocelí (Complex Phase Steels – vícefázové ocele)

Hlavní charakteristikou CP ocelí je velmi jemnozrná struktura materiálu, která zvyšuje jeho tvářitelnost a zároveň zdokonaluje rozměrovou stálost výlisků.

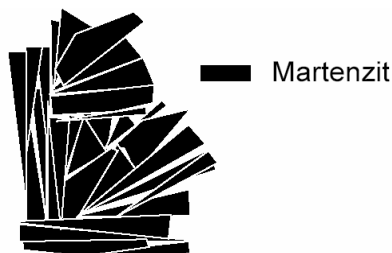
Pro zvýšení pevnosti se u těchto ocelí využívá mechanismus nazývaný strukturní zpevnění, při kterém se do kovové matrice zavádí různé strukturní složky lišící se tvrdostí a to tak, aby jejich rozložení bylo co nejrovnoměrnější. Vhodným deformačně tepelným zpracováním se dosahuje vzniku vícefázových ocelí s pevností až 1100 MPa, které se vyznačují vynikající úrovní dynamického zpevnění. CP ocele mají schopnost absorbovat energii při bariérových zkouškách – crash testech vykonávaných při rychlostech 50km/h. Vyrábějí i CP ocele s BH efektem s přírůstkem pevnosti až 115 MPa. Struktura CP ocelí je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Struktura DP, TRIP a CP ocelí

2.4.4 MS ocele (Martenzitické ocele)

Základem těchto ocelí je feriticko-perlitická struktura u kterých můžeme snížením válcovací teploty získat feriticko-bainitickou strukturu s pevností až 650 MPa. Při dalším snížení teploty a zvýšením deformace lze dosáhnout převážně martenzitické struktury s pevností až 1300 MPa. Strukturu MS ocelí můžeme vidět na obr. 2.2.



Obr. 2.2 Struktura MS ocelí

2.4.5 Termomechanicky zpracované nízkolegované ocele

Řadí se mezi nejpevnější skupinu vysokopevnostních ocelí. Základní strukturou u těchto ocelí tvoří bainit a martenzit. Vycházíme-li z feriticko-perlitické struktury s pevností 550 MPa a snížíme-li válcovací teploty, je možné získat feriticko-bainitickou strukturu s pevností až 650 MPa. Dalším ochlazením a zvýšením deformace lze dosáhnout převážně martenzitické struktury s pevností až 1200 MPa. Mimořádnou pozornost automobilového průmyslu přitahují varianty zcela oprávněně termomechanicky zpracované ocele s úplně martenzitickou strukturou s pevností často převyšující 1400 MPa.

I přes vysoké hodnoty mechanických vlastností lze tyto ocele i v omezené míře tvářet za studena. Válcováním za tepla je možné z této ocele vyrobit pásy tloušťky 1,5 mm.

Při vývoji těchto nových ocelí se musí přiblížit požadavkům automobilového průmyslu na zvýšení korozní odolnosti karoserie. Za tímto účelem se automobilové plechy pozinkovávají.

Přehled základních mechanických vlastností ocelí používaných na stavbu karoserie je uveden v tab. 2.4.



Tab. 2.4 Vlastnosti ocelí pro stavbu karoserií

Materiál	Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost A_{80}	Exponent def.
	[MPa]	[MPa]	[%]	Zpevnění [-]
Ocele uklidněné Al	140 - 280	270 - 410	20 - 40	0,20
IF ocele	120 - 140	250 - 290	20 - 45	0,23
BH ocele	200 - 300	350 - 450	min. 36	0,19
TRIP ocele	400 - 700	600 - 1000	22 - 26	0,18
DP ocele	270 - 460	500 - 600	18 - 25	0,14
CP ocele	680 - 700	800 - 1050	min. 10	0,12



3 Základní vlastnosti kovů a jejich zkoušení [5,6]

Kovy mají velmi rozmanité vlastnosti, které odpovídají jejich chemickému složení, struktuře i druhu a způsobu zpracování. Neustále se vyvíjí nové strojírenské materiály se stále zvyšující se kvalitativní úrovní.

Základní dělení vlastností kovů:

Fyzikální – Charakterizují chování materiálu při fyzikálních změnách. Jsou určeny stavbou atomu, která umožňuje tvorbu kovové vazby. Patří sem zejména (měrná hmotnost, stlačitelnost, objemová roztažnost, měrné teplo, teplota tání, elektrická vodivost, tepelná vodivost, magnetické vlastnosti a další).

Chemické – Charakterizují chování materiálu při chemických změnách (koroze atd.)

Mechanické – Charakterizují chování materiálu při mechanickém namáhání vnějšími silami. Základní mechanické vlastnosti jsou pružnost, plasticita, pevnost a houževnatost.

Technologické – Charakterizují chování materiálu při daném technologickém zpracování. Nejdůležitější technologické vlastnosti jsou svařitelnost, tvárnost, slévatelnost a obrobiteľnost.

3.1 Zkoušení kovů

Zkoušení kovů vyžaduje dokonalé znalosti jejich vlastností, charakteristik, které slouží k jejich hodnocení a zkušební postupy, kterými se tyto vlastnosti zjišťují.

Zkoušky kovů se dle své podstaty dělí na:

- Chemické
- Fyzikální
- Fyzikálně-chemické
- Strukturní
- Technologické
- Defektoskopické
- Mechanické



Mechanické zkoušky

Základem mechanických zkoušek je stanovení srovnatelných hodnot na vzorcích materiálu za přesně daných mechanických podmínek. Tyto hodnoty jsou nezbytné pro výpočty strojních dílů. Proto jsou tyto zkoušky většinou normalizované.

Podle způsobu působení síly na zkušební tělesa dělíme tyto zkoušky na statické, dynamické a cyklické.

Statické zkoušky – Namáhání zkušební vzorku se děje plynule rostoucí silou až do jeho porušení. Jsou to tzv. zkoušky destruktivní.

Podle působící síly je dělíme na:

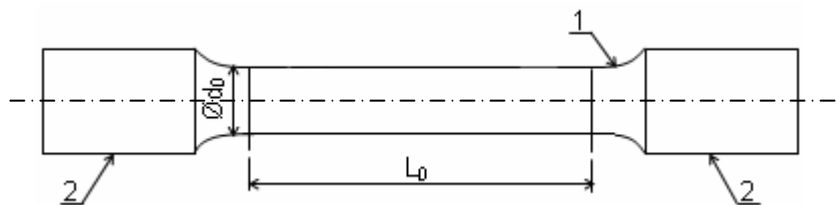
- zkoušku tahem
- zkoušku tlakem
- zkoušku ohybem
- zkoušku krutem
- zkoušku stříhem

Zkoušky dynamické a cyklické – Na zkušební vzorek, určitých rozměrů a tvaru působíme, buď rázovou silou, nebo opakujícím se zatěžováním a odlehčováním zkušební tělíska. Poté sledujeme počet cyklů odlehčení a zatížení při určitém charakteru namáhání do vzniku prvních trhlinek na zkoušeném tělese. Podle teploty se dále dělí na zkoušky: za normální teploty, za zvýšené teploty a za nízké teploty.

3.1.1 Zkouška tahem (ČSN EN 10002-1)

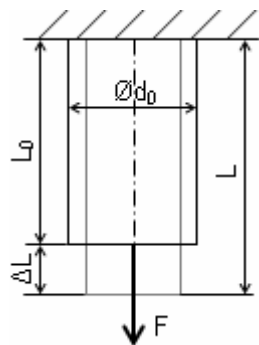
Tato zkouška je nejběžnější a nejdůležitější z mechanických zkoušek. Podstatou zkoušky je zatěžování zkušební tyče předepsanou rychlostí, většinou až do rozrušení. Účelem je zjistit mechanické hodnoty materiálu při namáhání jednoosým tahem. Jednoosý tah je se zvyšuje plynule se zvyšující se silou vyvozenou trhačím strojem.

Pro zkoušku v tahu se používají dva základní druhy zkušebních tyčí: kruhového nebo obdélníkového průřezu. Schématické znázornění tyče je na obr. 3.1.



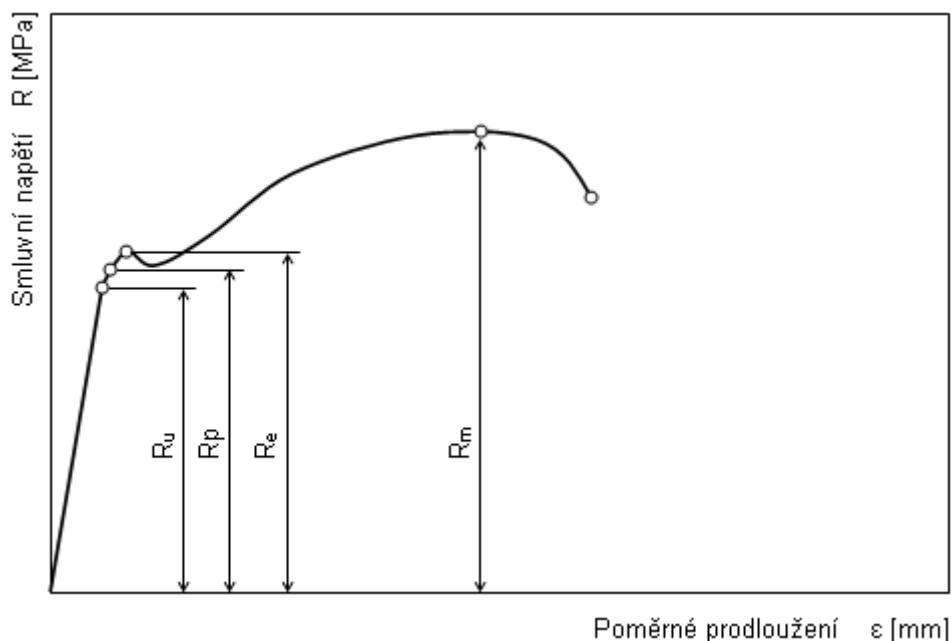
1 – dřík tyče

2 – upínací část tyče do trhacího stroje

Obr. 3.1 Schématické znázornění zkušební tyče**Obr. 3.2** Schématické znázornění chování tyče při zkoušce tahem

Začne-li na zkušební tyč působit osová tahová síla F , způsobuje v tělísku napětí. Napětí vyvolává deformace a tyč se začne natahovat a zužovat (platí zákon o zachování objemu) až do přetržení. V okamžiku přetržení má tyč délku L_u a průřez S_u .

Lze zjistit prodloužení tyče ε nebo absolutní prodloužení tyče ΔL . Pracovní diagram tahové zkoušky sleduje závislost, buď smluvní napětí a poměrné prodloužení nebo síly a prodloužení tyče. Více se používá diagram napětí – poměrné prodloužení.



Obr. 3.3 Pracovní diagram zkoušky tahem

Z pracovního diagramu lze určit řadu důležitých materiálových parametrů, zejména:

- R_u – mez úměrnosti – Je to maximální napětí, do kterého platí Hookův zákon $R = E \cdot \varepsilon$ (to je rovnice přímky procházející počátkem). Napětí je přímo úměrné prodloužení. E – Youngův modul pružnosti.
- R_p – mez pružnosti – Je to maximální napětí, po které vznikají pouze pružné deformace a je velmi blízká mezi úměrnosti R_u . Technicky je velmi obtížně zjistitelná, a proto se prakticky definuje *smluvní mez pružnosti* $R_{0,005}$, což je napětí, které po odlehčení tyče zanechá trvalou deformaci zkušební tyče 0,005 % původní délky L_0 .
- R_e – mez kluzu – Je napětí, přičemž se zkušební tyč začne prodlužovat, aniž by stoupalo zatížení, které někdy dokonce poklesne. V materiálu se objevují první plastické deformace, v praxi se zavádí *smluvní mez kluzu* $R_{p0,2}$, což je napětí, které zanechává trvalou deformaci tyče 0,2 % L_0 .
- R_m – mez pevnosti – Je to největší smluvní napětí, které materiál vydrží bez porušení. V tomto okamžiku se začne na tyči vytvářet nápadné zúžení (krček), část energie se spotřebovává na tvorbu krčku, nastává pokles napětí a přetržení tyče.



Při zkoušce tahem se vyhodnocuje:

Mez pevnosti:
$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3.1)$$

Mez kluzu:
$$R_e = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}] \quad (3.2)$$

Tažnost (A): Je to poměr prodloužení tyče po přetržení k počáteční délce tyče, vyjádřený v procentech:

$$A_{(x)} = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.3)$$

U tažnosti zavádíme index např.: A_5 , A_{10} . Index charakterizuje rozměry tyče.

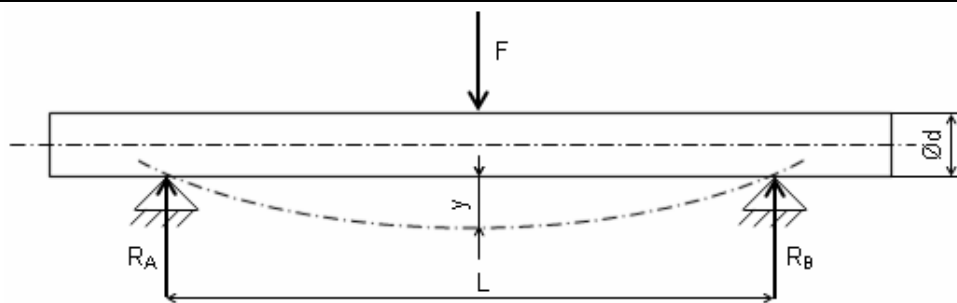
Kontrakce (Z): Je dána poměrem zúžení průřezu tyče po přetržení ($S_0 - S_u$) k původnímu průřezu tyče S_0 , vyjádřeného v procentech:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3.4)$$

Průběh pracovního diagramu se mění podle druhu zkoušeného materiálu. Některé materiály vykazují výraznou mez kluzu (např. některá ocel) a některé materiály jsou bez výrazné meze kluzu (litina).

3.1.2 Zkouška ohybem

Tato zkouška se především používá pro křehké materiály, neboť houževnaté materiály se ohýbají tak snadno, že lom vůbec nemusí nastat. Zkušební tyč podepřeme na dvou válečkových podporách a uprostřed zatěžíme osamělou silou F (obr. 3.4). Zkušební tyč je nejvíce namáhána uprostřed své délky, kde je největší ohybový moment.



Obr. 3.4 Schématické znázornění zkoušky v ohybu

Zjišťujeme zde hlavně pevnost v ohybu, která se spočítá podle vztahu:

$$R_{mo} = \frac{M_{o\max}}{W_o} \text{ [MPa]} \quad (3.5)$$

kde $M_{o\max}$ je maximální ohybový moment tyče (při zlomení), který je pod zátěžovou silou:

$$M_{o\max} = R_A \cdot \frac{L}{2} = \frac{F \cdot L}{4} \text{ [Nm]} \quad (3.6)$$

a W_o – průřezový modul v ohybu, který se vyjádří jako:

$$W_o = \frac{J}{z_{\max}} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.7)$$

J - moment setrvačnosti průřezu k neutrální ose [m⁴]

z_{\max} – vzdálenost krajního vlákna od neutrální osy [m]

Průřezový modul pro kruhový profil $\varnothing d$ je:

$$W_o = \frac{\pi \cdot d^3}{32} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.8)$$

Průřezový modul pro obdélník šířky b a výšky h je:

$$W_o = \frac{b \cdot h^2}{6} \text{ [m}^3\text{]} \quad (3.9)$$



Namáháme-li průřez materiálu na ohyb, jsou pak horní vlákna tlačena a spodní tažena. Ohybové napětí je tedy kombinací tahu a tlaku.

Při pozvolně stoupajícím zatížení odměřujeme průhyb tyče y až do okamžiku než se tyč přelomí. Průhyb je dán vztahem:

$$y = \frac{F l_p^3}{48 E J} \quad (3.10)$$

Z tohoto vztahu poměrně snadno zjistíme Youngův modul pružnosti (E) u křehkých materiálů.

3.2 Modul pružnosti [7]

Definice: Míra odporu materiálu vůči deformaci, tj. míra tuhosti materiálu. Je definován poměrem síly působící kolmo na jednotku plochy k deformaci, kterou tato síla působí v oblasti pružných deformací. Jednotkou modulu pružnosti jsou obvykle [MPa]. Rozlišujeme modul pružnosti v tahu pro který se užívá symbol E a ve smyku se symbolem G .

Podle způsobu určení mluvíme o statickém a dynamickém modulu pružnosti v tahu.

3.2.1 Statické určování modulu pružnosti

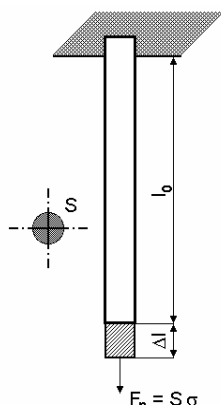
Jsou založené na postupném zvyšování zatížení a měření vzniklých deformací dávají výsledky nižší než metody dynamické. Rozdíl je pravděpodobně způsoben okolnostmi, že u statických metod pracujeme při napětích větších, ležících již nad fyzikální mezí pružnosti, kdežto při metodách dynamických jsou pod ní. [7]

3.2.1.1 Stanovení modulu pružnosti v tahu přímou metodou [8]

Modul pružnosti v tahu neboli Youngův modul E je poměr normálového (tahového resp. tlakového) napětí σ a poměrného podélného prodloužení ε v oblasti pružné deformace.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad [\text{MPa}] \quad (3.11)$$

Normálové napětí je pak definováno jako poměr síly F_n působící ve směru osy tyče (drátu) a plochy S průřezu tyče nebo drátu (viz též obr.3.5).



$$\sigma = \frac{F_n}{S} \quad [\text{N/m}^2] \quad (3.12)$$

Poměrné podélné prodloužení je dáno poměrnou změnou délky tyče (drátu) ve směru působení síly, pro malé deformace je jej možno vyjádřit vztahem:

Obr. 3.5 Schéma zkoušky tahem

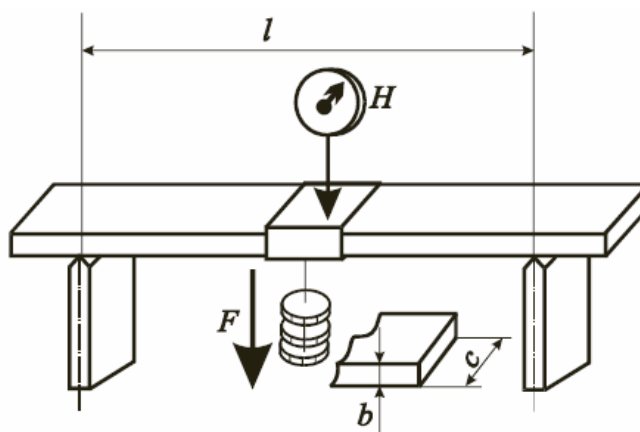
$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad [-] \quad (3.13)$$

Vztah (3.11) je vyjádření Hookova zákona, který po dosazení ze vztahů (3.12) a (3.13) je možné přepsat do výsledného vztahu pro modul pružnosti:

$$E = \frac{l_0}{\Delta l} \frac{F_n}{S} \quad [\text{MPa}] \quad (3.14)$$

3.2.1.2 Stanovení modulu pružnosti v tahu z průhybu tyče [9]

Vodorovná tyč podepřená na dvou rovnoběžných hranách vzdálených od sebe na délku l a kolmých k ose tyče, zatíženou silou F , působící uprostřed mezi nimi, se prohne tak, že se její střed sníží o délku y , pro kterou z teorie pružnosti plyne vztah, viz. (3.10). Schéma měřící aparatury pro měření modulu pružnosti v tahu je znázorněn na obr. 3.6.



Obr. 3.6 Schéma měřicí aparatury pro měření modulu pružnosti v tahu

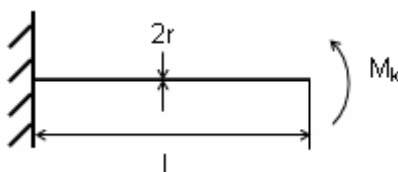
3.2.1.3 Stanovení modulu pružnosti ve smyku – torzní metoda [10]

Homogenní tyč délky l kruhového průřezu o poloměru r je na jednom konci upevněna (pro laboratorní účely se používá drát z daného materiálu o konstantním průměru). Působíme-li na volný konec tyče silovou dvojicí o momentu M_k , pootočí se volný konec o úhel φ , pro který platí:

$$\varphi = \frac{2lM_k}{\pi G r} \quad [\text{rad}] \quad (3.15)$$

- směr M_k je rovnoběžný s podélnou osou tyče.

Jednoduché schéma měřicí aparatury je na obr. 3.7.



Obr. 3.7 Schéma aparatury

3.2.2 Dynamické určování modulu pružnosti

U dynamického určování modulu pružnosti je výhodou, že největší napětí při zkoušce jsou velmi nízká. Leží vždy pod fyzikální mezí pružnosti, odpadají vlivy dopružování apod.[7].

3.2.2.1 Stanovení modulu pružnosti ve smyku metodou torzních kmitů [9]

Modul pružnosti ve smyku, nebo-li modul torze, lze měřit na základě torzních kmitů fyzikálního kyvadla. Je-li na drátě l a poloměru r zavěšeno těleso o momentu setrvačnosti J , platí pro torzní kmity rovnice:

$$J \cdot \varepsilon = -\frac{G}{2\pi} \frac{(\pi r^2)^2}{l} \cdot \varphi, \quad (3.16)$$

kde ε je úhlové zrychlení, φ výchylka z rovnovážné polohy a G modul torze. Rozkmit může být dosti veliký, protože kmity jsou harmonické při libovolném rozkmitu. Těleso zavěšené na drátě koná kmitavý pohyb, pro jehož kruhovou frekvenci platí vztah:

$$\omega = \frac{4\pi^2}{T^2} = \frac{G}{\pi} \frac{(\pi r^2)^2}{lJ} \quad (3.17)$$

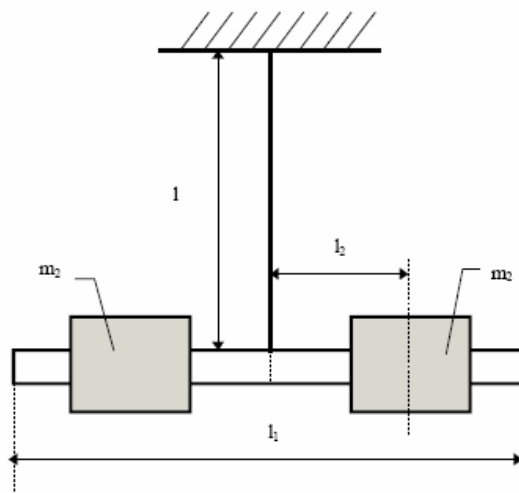
a odtud doba kmitu:

$$T = \frac{2}{r^2} \sqrt{\frac{2\pi lJ}{G}} \quad (3.18)$$

Změříme-li délku drátu, jeho poloměr, dobu kmitu a moment setrvačnosti zavěšeného tělesa, vypočteme modul torze ze vztahu:

$$G = \frac{8\pi lJ}{r^4 T^2} \quad (3.19)$$

Schéma měřicí aparatury pro měření modulu pružnosti ve smyku je zobrazen na obr. 3.8.



Obr. 3.8 Schéma měřicí aparatury pro měření modulu pružnosti ve smyku

4 Experimentální část

Na základě zadání bakalářské práce bylo cílem této práce zjistit modul pružnosti materiálu pro vysokopevnostní plechy. Tato vlastnost patří mezi důležité vlastnosti potřebné pro určení parametrů tvářecího stroje a podmínek tváření. K určení modulu pružnosti v tahu byly použity tři typy vysokopevnostních materiálů, které jsou v následující odstavcích popsány.

4.1 Vybrané materiály a jejich charakteristiky

4.1.1 Materiál RA-K 40/70

Jedná se o TRIP ocel vykazující BH efekt. Materiál RA-K 40/70 je jedním ze zástupců z řady materiálů RA-K (Restaustenit-Stahl). Chemické složení je uvedeno v tab. 4.1. Plech je za studena válcovaný. Struktura může mít do 20 % zbytkového austenitu a zbylé množství bainitu, včetně feritického bainitu. Tento materiál má podle údajů výrobce mez pevnosti $R_m \geq 700$ MPa a velmi dobrou tažnost ($A_{80} \geq 24$ %). Je především vhodný pro výrobu jednoduchých výlisků. Materiál RA-K 40/70 se používá především v leteckém a automobilovém průmyslu pro výrobu tvarově složitých součástí náročných na pevnost.

Tab. 4.1 Chemické složení materiálu RA-K 40/70

Prvek [max.%]	C	Si + Al	Mn	S	P	Cr
RA-K 40/70	0,22	2,2	2,0	0,015	0,06	0,5

4.1.2 Materiál CP-W 800

Tento materiál se řadí do skupiny vícefázových ocelí. Plech je válcovaný za tepla a termomechanicky doválcován. Chemické složení je uvedeno v tab. 4.2. Struktura je tvořena bainitem, feritem a martenzitem. Mez pevnosti R_m je v rozmezí 800 – 990 MPa a tažnost $A_{80} \approx 10$ %. Materiál CP-W 800 se vyznačuje vysokou pevností,



zaručenou svažitelností a velmi dobrou odolností proti opotřebení. Používá se na velmi namáhavé součástky v automobilovém a leteckém průmyslu.

Tab. 4.2 Chemické složení materiálu CP-W 800

Prvek [max.%]	C	Si	Mn	P	S	Nb	Ti	Cr	Mo
CP-W 800	≤ 0,18	≤ 1,0	≤ 2,2	≤ 0,025	≤ 0,01	≤ 0,09	≤ 0,18	≤ 0,6	≤ 0,4

4.1.3 Materiál MS-W 1200

Tento materiál patří do skupiny vícefázových ocelí. MS-W 1200 je za tepla válcovaná martenzitická ocel, která je určena k tváření za studena. Struktura je tvořena jemnozrnným martenzitem, bainitem a feritem. Na základě této struktury a chemického složení viz. tab. 4.3 dosahuje tento materiál vysoké pevnosti, odolnosti proti opotřebení a dobré svažitelnosti. Dle údajů výrobce má tento materiál mez pevnosti R_m v rozmezí 1200 – 1450 MPa a tažnost $A_{80} \approx 5 \%$. Používá se též především v leteckém a automobilovém průmyslu.

Tab. 4.3 Chemické složení materiálu MS-W 1200

Prvek [max.%]	C	Mn	Si	P	S
MS-W 1200	≤ 0,18	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 0,02	≤ 0,01

Všechny tyto materiály jsou vyráběny a dodávány firmou ThyssenKrupp. Kompletní specifikace vlastností použitých materiálů jsou uvedeny v materiálových listech v přílohách P1, P2 a P3.

V experimentální části byli nejprve ověřeny mechanické hodnoty výše uvedených materiálů ze statické zkoušky tahem. Poté byl zjišťován modul pružnosti E těchto materiálů.

4.2 Měření mechanických vlastností materiálů

4.2.1 Statická zkouška tahem

Ke zjištění mechanických vlastností materiálů bylo použito zkušební zařízení TIRATEST 2300 se softwarem LABTEST2, viz obr. 4.1. Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s EN 10002. Rovněž metodika provedení a vyhodnocení zkoušky je v souladu s výše uvedenou normou.

Zařízením byly vyhodnocovány tyto mechanické vlastnosti :

- R_m
- A_{50}
- $R_{p0,2}$

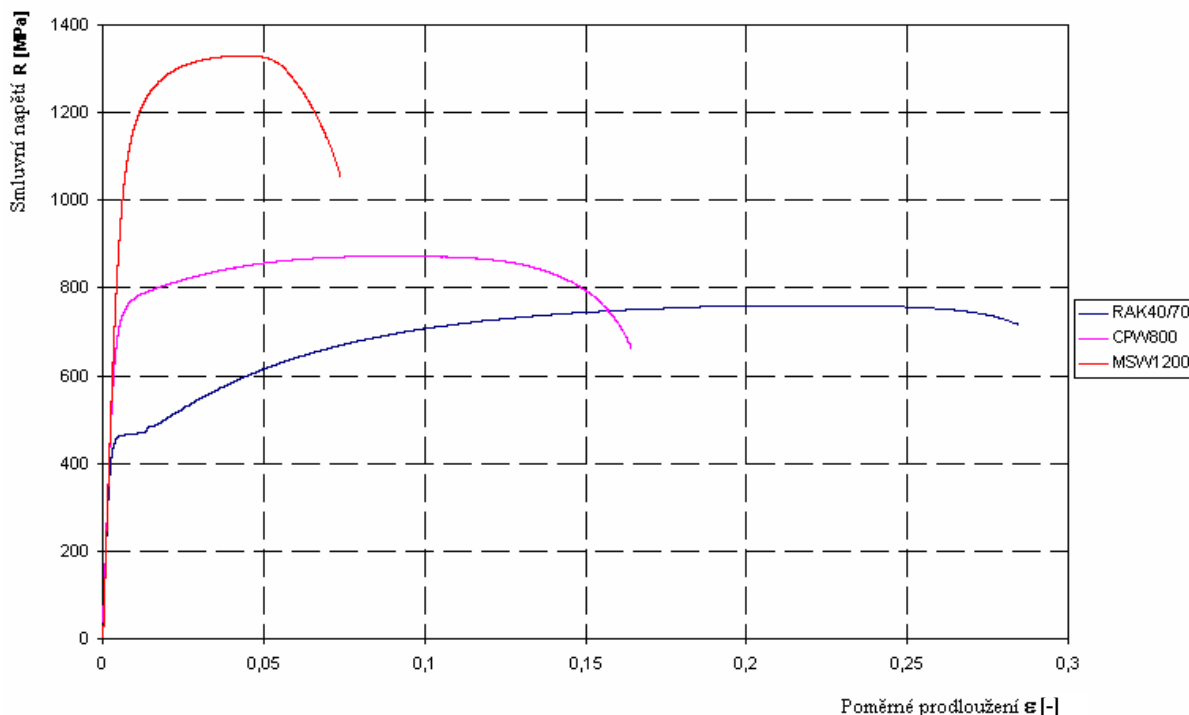


Obr. 4.1 Zkušební zařízení TIRATEST 2300

4.2.2 Výsledky statické zkoušky tahem

Mechanické hodnoty byly vyhodnocovány ze souborů devíti vzorků pro každý materiál. U některých vzorků došlo k lokalizaci deformace mimo rozsah průtahoměru a proto tyto výsledky nebyly do výsledných hodnot započítány.

V příloze P4 jsou uvedeny výstupní protokoly ze statické zkoušky tahem pro materiály RA-K 40/70, CP-W 800 a MS-W 1200. Základní získané mechanické vlastnosti u testovaných materiálů jsou uvedeny v tab. 4.4. Křivky zpevnění jednotlivých materiálů jsou zobrazeny na obr. 4.2.



Obr. 4.2 Grafické porovnání RA-K 40/70, CP-W 800, MS-W 1200

Tab. 4.4 Mechanické hodnoty mat. RA-K 40/70, CP-W 800, MS-W 1200

Materiál	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{50} [%]
RA-K 40/70	$459 \pm 2,54$	$760 \pm 3,08$	$27,9 \pm 0,71$
CP-W 800	$750 \pm 10,72$	$899 \pm 7,44$	$15,4 \pm 0,64$
MS-W 1200	$1069 \pm 7,82$	$1329 \pm 3,56$	$6,9 \pm 0,58$



4.2.3 Dílčí závěr

Z obr. 4.2 ze statické zkoušky tahem je vidět, že materiál RA-K 40/70 má oproti materiálům CP-W 800 a MS-W 1200 výraznější mez kluzu. Z použitých materiálů dosahuje nejvyšší tažnost o hodnotě 0,28 (28%). Materiál CP-W 800 se vyznačuje zcela nevýraznou mezí kluzu a oproti RA-K 40/70 má pouze tažnost 0,165. O materiálu MS-W 1200 můžeme říci, že je v porovnání s ostatními nejpevnější a vykazuje jen minimální tažnost 0,075. Jeho mez kluzu je nevýrazná podobně jako u materiálu CP-W 800.

Pokud jde o soulad naměřených hodnot s parametry příslušných materiálových listů, můžeme konstatovat, že hodnoty $R_{p0,2}$, R_m a A_{50} materiálu RA-K 40/70 leží v rozmezí hodnot udávaných v materiálovém listě. U materiálů CP-W 800 a MS-W 1200 takto souhlasí hodnoty R_m . Hodnoty $R_{p0,2}$ a A_{50} u materiálů CP-W 800 a MS-W 1200 vykazují značnější odchylky oproti materiálovým listům. Jeví se pravděpodobně, že tyto odchylky mají příčinu v delším skladování měřených vzorků s následnou změnou původních parametrů.

4.3 Určování modulu pružnosti

Pro určení modulu pružnosti ze zkoušky tahem a zkoušky ohybem bylo použito stejné zkušební zařízení jako u zjišťování mechanických vlastností. Vzorky byly dodány ve stavu broušeném a mohly být testovány bez dalších úprav.

4.3.1 Zkouška tahem

Zkušební tyče byly odebrány ve směru 0° vůči směru válcování. Modul pružnosti pro testované materiály byl stanoven vždy ze souboru tří vzorků. Tvar a rozměry zkušebních tyčí jsou v souladu s EN 10002.

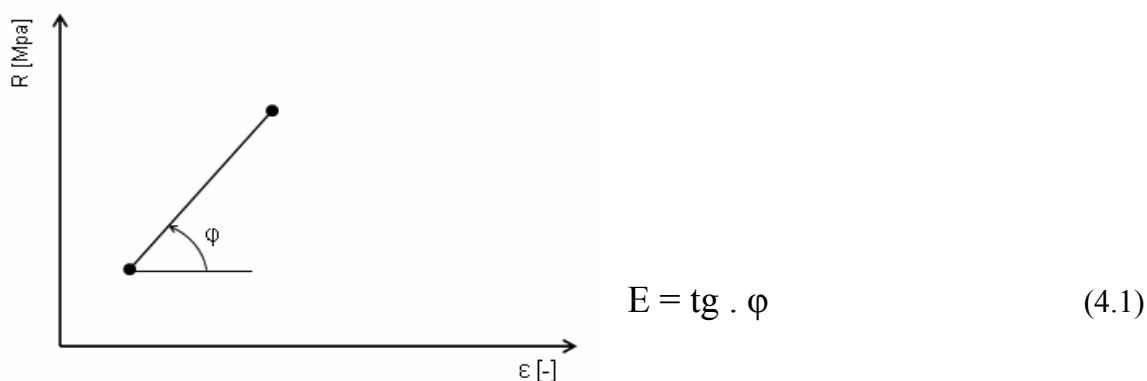
4.3.1.1 Popis měření

Měření byla prováděna na zkušebním zařízení TIRATEST 2300 s tím, že bylo použito mechanického průtahoměru MFN-4-500 se zvýšenou přesností záznamu protažení testovaného materiálu. Zatížení zkušebního vzorku se uskutečnilo posuvným

pohybem horní upínací čelisti rychlostí 1 mm/min. V průběhu měření byla zaznamenávána síla v závislosti na posuvu této čelisti.

4.3.1.2 Vyhodnocení

Výpočet modulu pružnosti E byl proveden přes tangentu úhlu sklonu přímky z grafů v příloze P6. Pro přiblížení výpočtu uvádím upravenou část obecného diagramu tahové zkoušky, viz obr.4.3.



Obr. 4.3 Upravená část obecného diagramu tahové zkoušky

Vypočtené hodnoty modulu pružnosti E ze zkoušky tahem byly sestaveny do tabulky 4.5.

Tab. 4.5 Výsledky modulu pružnosti E ze zkoušky tahem

materiál	měření 1 E [MPa]	měření 2 E [MPa]	měření 3 E [MPa]	Průměrná hodnota E [MPa]
RA-K 40/70	206 059	204 011	207 938	206002,7 ± 1603,7
CP-W 800	211 121	184 609	194 310	196680,0 ± 10952,0
MS-W 1200	201 955	195 102	219 963	205673,3 ± 10484,5

Změřené hodnoty vykazují celkem vyhovující opakovatelnost měření. Jako výsledná hodnota modulu pružnosti E je považován průměr ze tří provedených měření, uvedený ve čtvrtém sloupci tabulky 4.5.

4.3.2 Zkouška ohybem

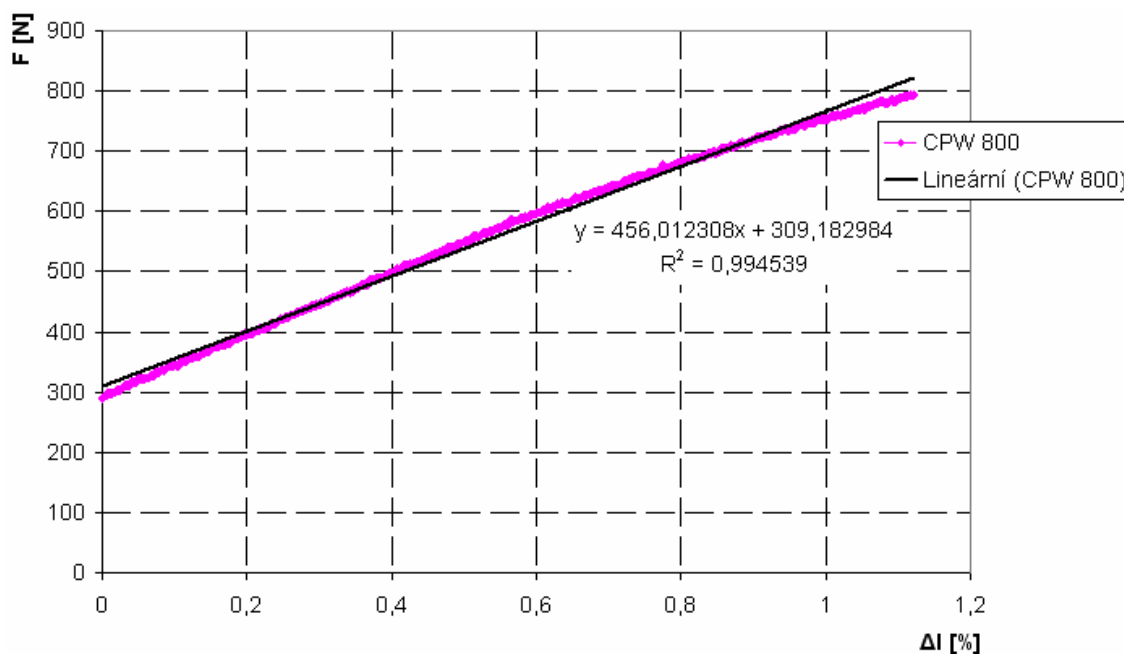
Jako druhá metoda pro určení modulu pružnosti E byla zvolena zkouška s tří bodovým ohybem. Vzorky byly vystřiženy ve stejném směru jako u zkoušky tahem, tj. ve směru 0° vůči válcování. Taktéž tvar zkušebních tyčí byl stejný. Měření bylo stanoveno ze souborů tří vzorků. Plochy průřezu potřebné pro výpočet modulu pružnosti byly naměřeny pomocí digitálního mikrometru MITUTOYO (model IDF-150). Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 4.6.

Tab. 4.6 Plochy průřezů vzorků

materiál	plocha průřezu
	[mm]
RA-K 40/70	18,7 x 1,41
CP-W 800	18,83 x 2,05
MS-W 1200	18,56 x 1,86

4.3.2.1 Popis měření

Tyčka byla volně položena na podporách. Rozměry vzdáleností podpor byly 63,6 mm. Rychlost posuvu horní čelisti byla nastavena na 1 mm/min. V průběhu zkoušky byla deformace snímána laserovým průtahoměrem, který měřil průhyb. Třemi měření byla zjišťována pro každý materiál síla F v závislosti na Δl . Příklad grafického průběhu měření je uveden na obrázku 4.4. Příslušné grafy jsou uvedeny v příloze P5.



Obr. 4.4 Grafická ukázka

4.3.2.2 Vyhodnocení

Pro výpočet modulu pružnosti byl použit vzorec uvedený v teoretické části (3.10), který byl pro zjednodušení upraven do tvaru:

$$y = E \cdot B \Rightarrow E = \frac{y}{B} \quad (4.2)$$

, kde y je směrnice přímky získaná z grafů ze zkoušky ohybu.

$$\text{Rovnice přímky : } g = y \cdot x + q \quad (4.3)$$

$$B = \frac{4bh^3}{l_p^3} \quad (4.4)$$

- B.... konstanta
- E.... modul pružnosti



Vypočtené hodnoty modulu pružnosti E zkouškou ohybem byly sestaveny do tabulky 4.7.

Tab. 4.7 Výsledky modulu pružnosti ze zkoušky ohybem

materiál	měření 1	měření 2	měření 3	Průměrná hodnota
	E [MPa]	E [MPa]	E [MPa]	E [MPa]
RA-K 40/70	202455,6	220 321,8	207 303,2	$210\,026,9 \pm 7543,8$
CP-W 800	180790,7	201 171,4	204 120,9	$195\,361,0 \pm 10372,9$
MS-W 1200	202106,1	205 770,7	207 274,5	$205\,050,4 \pm 2170,5$

Změřené hodnoty zde vykazují ještě lepší opakovatelnost měření než u zkoušky tahem. Jako výsledná hodnota modulu pružnosti E je i zde vypočítán průměr ze tří provedených měření, uvedený ve čtvrtém sloupci tabulky 4.7.

5 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo experimentálně určit modul pružnosti u tří vybraných druhů pevnostních plechů s různými mechanickými vlastnostmi. Pro zkoušky byly zadány materiály RA-K 40/70, CP-W 800, MS-W 1200.

V rámci práce byly nejdříve experimentálně ověřeny statickou zkouškou tahem mechanické vlastnosti všech tří materiálů a porovnány s tabulkovými hodnotami příslušných materiálových listů.

Z výsledků měření lze konstatovat, že materiál RA-K 40/70 má oproti materiálům CP-W 800 a MS-W 1200 výraznější mez kluzu. Z použitých materiálů dosahuje nejvyšší tažnost o hodnotě 0,28 (28%). Materiál CP-W 800 se vyznačuje zcela nevýraznou mezí kluzu a oproti RA-K 40/70 má pouze tažnost 0,165. O materiálu MS-W 1200 můžeme říci, že je v porovnání s ostatními nejpevnější a vykazuje jen minimální tažnost 0,075. Jeho mez kluzu je nevýrazná podobně jako u materiálu CP-W 800.

Pokud jde o soulad naměřených hodnot s parametry příslušných materiálových listů, můžeme konstatovat, že hodnoty $R_{p0,2}$, R_m a A_{50} materiálu RA-K 40/70 leží v rozmezí hodnot udávaných v materiálovém listě. U materiálů CP-W 800 a MS-W 1200 takto souhlasí hodnoty R_m . Hodnoty $R_{p0,2}$ a A_{50} u materiálů CP-W 800 a MS-W 1200 vykazují značnější odchylky oproti materiálovým listům. Jeví se pravděpodobně, že tyto odchylky mají příčinu v delším skladování měřených vzorků s následnou změnou původních parametrů.

Pro určení modulu pružnosti jsem zvolil metodu porovnání hodnot dosažených nezávislými zkouškami tahem a ohybem. Na základě vyhodnocení a porovnání výsledků z obou zkoušek je možno konstatovat velmi dobrou shodu naměřených hodnot modulu pružnosti E . U materiálu RA-K 40/70 leží rozdíl mezi průměrnými hodnotami tří tahových a tří ohybových zkoušek v rozmezí 2%. Materiál CP-W 800 vykazuje obdobný rozdíl 0,5% a materiál MS-W 1200 dokonce jen 0,35%.

Výsledné hodnoty modulu pružnosti E , experimentálně určené v rámci této bakalářské práce při zkouškách tahem jsou:

Materiál RA-K 40/70 $E = 206002,7 \pm 1603,7$ MPa

Materiál CP-W 800 $E = 196680,0 \pm 10952,0$ MPa



Materiál MS-W 1200 $E = 205673,3 \pm 10484,5 \text{ MPa}$

Obdobně platí následující hodnoty získané ohybovou zkouškou:

Materiál RA-K 40/70 $E = 210\,026,9 \pm 7543,8 \text{ MPa}$

Materiál CP-W 800 $E = 195\,361,0 \pm 10372,9 \text{ MPa}$

Materiál MS-W 1200 $E = 205\,050,4 \pm 2170,5 \text{ MPa}$

Pro každou trojici zkoušek jsou uvedeny aritmetické průměry a směrodatné odchylky.

Na základě experimentálně zjištěných hodnot modulu pružnosti E testovaných materiálů je vidět, že výsledné hodnoty se přibližují k hodnotám udávaných v tabulkách. V případě, že se používá do výpočtu tabulková hodnota, nedopouštíme se výraznější chyby. Pro návrh výrobku z vysokopevnostního plechu je často důležitý znát velikost odpružení, které je mimo jiné značně závislé na modulu pružnosti. Z tohoto důvodu je nutno pro přesný výpočet modul pružnosti zjišťovat. V rámci bakalářské práce bylo prokázáno, že výsledky zjištěné ze zkoušky ohybem byly přesnější, vykazovaly menší rozptyl.



6 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BENEŠ, F.- MOHELSKÝ, F.: Oceli se zvýšenou mezí kluzu v automobilovém průmyslu, ŠKODA, MB 1995
- [2] DOUBEK, P.: Výzkum deformačního chování vysokopevnostních plechů při vyšších rychlostech deformace, [Disertační práce], TUL, Liberec 2004
- [3] BILLY, J.: Trendy vývoja ocelových plechov pre ľahké automobilové konštrukcie.In.: Hutnické listy 1999. Vol3.
- [4] <http://www.usaautomotive.com>, březen 2006
- [5] ALEXIN, J. a kol.: Nauka o materiálu, VŠST, Liberec 1989
- [6] LAKAŠ, J.: Stanovení vlivu mechanických hodnot na velikosti odpružení při volném ohybu, [Diplomová práce], TUL, Liberec 2005
- [7] JAREŠ, V.: Základní zkoušky kovů a jejich teorie, Academia, Praha 1966
- [8] <http://www.tf.czu.cz>, duben 2006
- [9] <http://www.fyzika.ft.utb.cz>, duben 2006
- [10] <http://club.webs.cz>, duben 2006



7 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1: Materiálový list: RAK 40/70
- Příloha 2: Materiálový list: CPW 800
- Příloha 3: Materiálový list: MSW 1200
- Příloha 4: Protokoly ze statické zkoušky tahem
- Příloha 5: Výsledné grafy ze zkoušky ohybu
- Příloha 6: Výsledné grafy ze zkoušky tahem



Restaustenit-Stahl Kaltgewalztes Feinblech	Stahlbezeichnung	Werkstoff-Nr.	Werkstoffdatenblatt
	RA-K 38/60	Achtung: Ausdrücke / Kopien unterliegen nicht dem Änderungsdienst, es gilt grundsätzlich die Intranet-Version.	- vorläufig - Intranet-Version 1.0 (25.01.2000)
	RA-K 40/70 RA-K 42/80		

Geltungsbereich - Begriff

Dieses Werkstoffblatt gilt für kaltgewalztes unbeschichtetes (KB) und oberflächenveredeltes (ZE, ZN, Z, ZF) Feinblech mit gegenüber Dualphasenstählen angehobener Festigkeit und guter Kaltumformbarkeit bei sehr gutem Verfestigungsverhalten.

Bei Restaustenit-Stahl (TRIP-Stahl) kommt es während der Umformung zu einer Umwandlung (transformation) des Restaustenits zu Martensit, damit verbunden (induced) werden hohe Dehnungen (plasticity) auch bei hohen Festigkeiten erzielt. Die Restaustenit-Stähle eignen sich sowohl zum Streckziehen als auch zum Tiefziehen. Das Werkstoffverhalten ist gekennzeichnet durch eine starke Verfestigung selbst im Bereich großer Formänderungen, isotrope Umformeigenschaften und ein hohes Bake-Hardening-Potential insbesondere nach Vorverformung. Das hohe Energieabsorptionsvermögen bleibt auch bei dynamischer Beanspruchung erhalten. Das Gefüge besteht vornehmlich aus einer ferritischen Matrix, in die Restaustenit eingelagert ist. Der Ferritanteil einschließlich des ferritischen Bainits beträgt bis zu 90 %, der Anteil an Restaustenit bis zu 20 %; Anteile von Martensit können vorhanden sein.

Aufgrund der laufenden Weiterentwicklung der Restaustenit-Stähle sind die lieferbaren Abmessungen und Querschnitte anzufragen. Die derzeit gültigen Abmessungsspannen für kaltgewalztes unbeschichtetes und oberflächenveredeltes Feinblech sind:

Stahlsorte	KB, ZE, ZN		Z, ZF	
	Dicke in mm	Breite in mm	Dicke in mm	Breite in mm
RA-K 38/60	0,60-1,50	800-1400	0,70-1,50	1000-1300
RA-K 40/70	0,65-1,50	800-1400	0,70-2,00	800-1600
RA-K 42/80	0,70-1,50	800-1400	0,70-1,50	1000-1300

Anwendung

Die Restaustenit-Stähle eignen sich vor allem für umformtechnisch anspruchsvolle Bauteile mit hohen Streckzieh- und Tiefziehanteilen insbesondere im Fahrzeugbau zur Darstellung komplexer festigkeitsrelevanter Strukturelemente und Karosserieinnen- und außenhautteile. Die hohen erreichbaren Bauteilfestigkeiten und das gute dynamische Verhalten ermöglicht die Verwendung als Werkstoff für crashrelevante Teile, die aufgrund ihrer anspruchsvollen Konturen mit anderen Stählen nicht oder ziehtechnisch nur mit großen Schwierigkeiten darstellbar sind.


Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse in %)

C max.	Si + Al max.	Mn max.	S max.	P max.	Cr max.
0,22	2,2	2,0	0,015	0,06	0,5

Oberflächenart

Die Restaustenit-Stähle mit unbeschichteter und elektrolytisch beschichteter Oberfläche werden in den Oberflächenarten A und auf Anfrage in B geliefert.

Die Restaustenit-Stähle mit schmelztauchveredelter Oberfläche werden in den Oberflächenarten B und auf Anfrage in C geliefert.



ThyssenKrupp Stahl

Seite 1 von 2



Restaustenit-Stahl Kaltgewalztes Feinblech	Stahlbezeichnung		Werkstoff-Nr.	Werkstoffdatenblatt	
	RA-K 38/60 RA-K 40/70 RA-K 42/80		Achtung: Ausdrücke / Kopien unterliegen nicht dem Änderungsdienst, es gilt grundsätzlich die Intranet-Version.	- vorläufig - Intranet-Version 1.0 (25.01.2000)	

Technologische Eigenschaften (Richtwerte ¹⁾)

Stahlsorte	Streckgrenze R _{p0,2} in MPa	Zugfestigkeit R _m in MPa	Bruchdehnung A ₈₀ in %	Verfestigungs- exponent ²⁾ n _{10,UE} %	BH ₂ in MPa
RA-K 38/60	≥ 380	≥ 600	≥ 26	≥ 0,20	≥ 30
RA-K 40/70	≥ 400	≥ 700	≥ 24	≥ 0,19	≥ 30
RA-K 42/80	≥ 420	≥ 800	≥ 22	≥ 0,18	≥ 30

1) Die mechanischen Eigenschaften gelten für Längs- oder Querproben von kaltgewalzten Feinblech in den Ausführungen unbeschichtet, ZE und Z. Für ZN und ZF sind die n-Werte um 0,02 zu reduzieren. Wird nichts anderes bei der Bestellung vereinbart, ist die Prüfrichtung quer zur Walzrichtung.

2) n_{4,0}-Wert liegt um 0,04 höher.

Beispiele für Streckgrenzenzuwachs durch Vorrecken und Wärmebehandlung bei 170°C, 20 min. (ermittelt an Quer-Zugproben)

Reck- grad	RA-K 38/60				RA-K 40/70				RA-K 42/80			
	Work-Hardening WH	Bake-Hardening BH	Gesamt-Streckgrenze Re (Re _{Austenit} = 391) in MPa	Zugfestigkeit R _m in MPa	Work-Hardening WH	Bake-Hardening BH	Gesamt-Streckgrenze Re (Re _{Austenit} = 414) in MPa	Zugfestigkeit R _m in MPa	Work-Hardening WH	Bake-Hardening BH	Gesamt-Streckgrenze Re (Re _{Austenit} = 421) in MPa	Zugfestigkeit R _m in MPa
0=BH ₀	0	19	410	645	0	25	439	710	0	14	435	792
2=BH ₂	56	73	520	667	78	83	575	734	76	91	587	822
5	132	82	605	698	188	118	720	748	211	98	729	857
10	194	108	693	725	221	144	779	783	320	106	846	908
15	217	144	752	770	255	142	811	840	358	146	924	969


Verarbeitung

Alle für kaltgewalzte und oberflächenveredelte höherfeste Feinbleche üblichen Umform-, Füge- und Lackierbedingungen sind unter Berücksichtigung der spezifischen Werkstoffeigenschaften thermomechanisch erzeugter Stähle * auf die Sorten RA-K 38/60, 40/70 und 42/80 übertragbar.

Lieferung

Die Lieferung erfolgt in Anlehnung an DIN EN10130, DIN EN10152, DIN EN10142 und DIN EN10271 sowie der Thyssen Krupp Lieferprospekte für kaltgewalztes und oberflächenveredeltes Feinblech.

* d. h. für das Schweißen z. B.: Vorwärmung vermeiden und Wärmeeintrag begrenzen.



ThyssenKrupp Stahl

Seite 2 von 2



Ein Unternehmen
von ThyssenKrupp
Steel

ThyssenKrupp Stahl

Werkstoffblätter

**Achtung! Ausgedruckte TKS-
Werkstoffblätter unterliegen
nicht dem Änderungsdienst.
Es gilt die jeweils aktuelle
Version im Intra- bzw.
Internet.**



ThyssenKrupp

Complexphasenstähle	Stahlsorte	Kurzname	Werkstoff-Nr.	Werkstoffblatt
warmgewalzt TM-behandelt hoch- und verschleißfest kaltumformbar schweißbar Warmbreitband Spaltband	CP-W 800	S680MC	1.8998	1810 Juli 2003
	CP-W 900	S695MC	1.8949	
	CP-W 1000	S720MC	1.8997	

Geltungsbereich

Der Complexphasenstahl zählt zu der Gruppe der Mehrphasenstähle. Dieses Werkstoffblatt gilt für hochfeste Warmbandstähle, die im thermomechanisch gewalzten Zustand Mindestfestigkeiten von 800 - 950 MPa aufweisen. Aufgrund ihrer ausgewählten chemischen Zusammensetzung und ihres besonderen Walzverfahrens weisen diese Stähle eine extrem feine Mikrostruktur auf, die in der komplexen Wirkung mit den aufeinander abgestimmten Gefügeanteilen von Ferrit, Bainit, Martensit und Ausscheidungshärtung eine besonders attraktive Eigenschaftskombination von hoher Festigkeit und Verschleißfestigkeit mit guter Kaltumform- und Schweißbarkeit ergibt. Lieferbar sind Warmbreitband sowie daraus geschnittenes Spaltband und Blech in Dicken von 1,5 - 4,5 mm.

Anwendung

Die Stähle sind besonders vorgesehen für die gewichtssparende Herstellung von kaltumgeformten Bauteilen im Fahrzeugbau wie z. B. Türaufprallträger, Stoßfänger, Fahrwerksteile, Karosserieverstärkung, Profile usw.

Die gesamte Umform- und Anwendungstechnik ist von grundlegender Bedeutung für das Verarbeitungsverhalten bei der Herstellung von Bauteilen und ihren Gebrauchseigenschaften aus diesen Stählen. Der Verarbeiter muss sich davon überzeugen, dass seine Berechnungs-, Konstruktions- und Arbeitsverfahren werkstoffgerecht sind, dem Stand der Technik entsprechen und sich für den vorgesehenen Verwendungszweck eignen.

Die Auswahl des Werkstoffes obliegt dem Besteller.

Chemische Zusammensetzung (Schmelzenanalyse, %)

Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S ¹⁾	Nb ²⁾	Ti ²⁾	Cr	Mo
CP-W 800	≤ 0,18	≤ 1,0	≤ 2,20	≤ 0,025	≤ 0,010	≤ 0,08	≤ 0,18	≤ 0,60	≤ 0,40
CP-W 900									
CP-W 1000									

¹⁾ Zur Erzielung einer guten Kaltumformbarkeit wird ein besonders niedriger S-Gehalt eingestellt und / oder durch Zusatz von Legierungselementen eine günstige Sulfidausbildung bewirkt.

²⁾ Die Mikrolegierungselemente Nb und Ti werden einzeln oder in Kombination zulegiert, wobei ihre Summe ≤ 0,20 % ist.

CP-W-Stähle sind vollberuhigte Feinkornbaustähle, der Al-Gehalt beträgt min. 0,015 %. Zulässige Abweichung der Stückanalyse von den Grenzwerten der Schmelzanalyse entsprechend Tafel 2 des SEW 097.

Lieferzustand

Thermomechanisch gewalzt entsprechend SEW 082, gebeiztes und geöltes, unbesäumtes und besäumtes Warmbreitband, sowie daraus geschnittenes Spaltband und Blech in Dicken von 1,5 - 4,5 mm, elektrolytisch verzinkt bis 2,0 mm Dicke auf Anfrage ; feuerverzinkt, andere Dicken und Ausführungsarten auf besondere Vereinbarung.

**Mechanische Eigenschaften** im Lieferzustand bei Raumtemperatur (Querproben nach DIN EN 10002)

Stahlsorte	Mindeststreckgrenze $R_{p0,2}$ MPa	Zugfestigkeit R_m MPa	Mindestbruchdehnung		Dorn-Ø D ¹⁾ beim Faltversuch
			A_5 %	A_{90} %	
CP-W 800	680	800 - 980	12	10	D = 2,5a
CP-W 900	695	880 - 1050	12	10	D = 3,0a
CP-W 1000	720	950 - 1130	12	10	D = 3,5a

¹⁾ a = Probendicke, der Biegewinkel beträgt jeweils 180°.

Prüfumfang und -bescheinigung

Wenn bei der Bestellung nicht anders vereinbart, gilt für die Ablieferungsprüfung ein Zugversuch bei jedem 2. an der Lieferung beteiligten Warmbandcoil. Über diesen Mindestprüfumfang hinaus können bei der Bestellung besondere Vereinbarungen getroffen werden.

Prüfbescheinigungen je nach Vereinbarung bei der Bestellung nach DIN EN 10204.

Lieferbare Abmessungen

CP-W 800 / 900 / 1000	
Dicke (mm)	Breite (mm) ²⁾
1,50 – 1,59	≤ 1050
1,60 – 1,69	≤ 1150
1,70 – 1,79	≤ 1250
1,80 – 1,89	≤ 1300
1,90 – 1,99	≤ 1350
2,00 – 2,19	≤ 1400
2,20 – 2,49	≤ 1450
2,50 – 2,99	≤ 1500
3,00 – 3,49	≤ 1550
3,50 – 4,50	≤ 1600

²⁾ Breiten < 900 mm als Spaltband mit Mindestbreiten ≥ 115 mm.

Andere Abmessungen auf Anfrage.

Wärmebehandlung

Spannungsarmglühen bei 530 - 580 °C und einer Haltedauer von mind. 20 Minuten, anschließend Abkühlung an ruhender Luft. Eine Wärmenachbehandlung von 500 - 700 °C kann zur Streckgrenzensteigerung um bis zu 100 MPa genutzt werden (z. B. 680 °C, Haltezeit 0,7 min./mm Blechdicke im Salzbad).



Bake-Hardening

Nach einer Bake-Hardening Behandlung bei einer Temperatur von 170 °C und einer Haltezeit von 20 Minuten werden BH₂-Werte > 40 MPa, im Mittel 70 MPa erreicht.

Hinweise für die Verarbeitung

Im Hinblick auf den Verwendungszweck ist es die Aufgabe des Bestellers, die Beanspruchungsverhältnisse wie statische oder dynamische Belastung, eine mögliche Korrosion oder Wärmebehandlung des Bauteils zu berücksichtigen. Für Warmumformungen und Warmrichtvorgänge sind diese Stähle wegen möglicher Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften nicht zu empfehlen. Die Stähle können trotz ihrer hohen Festigkeit im allgemeinen gut kalt umgeformt werden. Dabei zeichnen sich diese Stähle durch starke Verfestigungen bereits bei geringen Verformungsbeträgen aus. Durch dieses gute Verfestigungsverhalten werden die bis zu rd. 10 % betragende Richtungsabhängigkeit der Streckgrenzhöhe (i. w. Bauschinger Effekt) ausgeglichen. Beim Kaltzuschneiden oder Autogenbrennen ist mit einer Verfestigung bzw. Aufhärtung der Schnitt- oder Brennkante zu rechnen. Werden diese anschließend kalt verformt, so kann ein Spannungsarmglühen, ein Abarbeiten oder ein Brechen der Kanten im Bereich der Biegezone erforderlich sein.

Die Stähle sind unter Beachtung der allgemeinen Regeln der Technik für die Hand- und Automatschweißung geeignet. Zu beachten sind dabei die Vorgaben des Stahl-Eisen-Werkstoffblattes 088 "Schweißgeeignete Feinkornbaustähle - Richtlinien für die Verarbeitung, insbesondere das Schweißen". Üblicherweise ist kein Vorwärmen erforderlich.

Für zusätzliche, über die Angaben des Werkstoffblattes hinausgehende Auskünfte und Beratung stehen dem Besteller die TKS-Werkstoffsachverständigen zur Verfügung.

Bezugsquellen

DIN EN-Normen

Beuth Verlag GmbH, Postfach, D-10772 Berlin

STAHL-EISEN-Werkstoffblätter

Verlag Stahleisen mbH, Postfach 105164, D-40042 Düsseldorf



Martensitphasen-Stahl Warmband	Stahlbezeichnung	Werkstoff-Nr.	Werkstoffdatenblatt
	MS-W 1000 MS-W 1200	Achtung: Ausdrucke / Kopien unterliegen nicht dem Änderungsdienst, es gilt grundsätzlich die Intranet-Version.	- vorläufig - Intranet-Version 1.0 (25.01.2000)

Martensitphasen-Stähle	Stahlbezeichnung	Werkstoff-Nr.	vorläufiges Werkstoffblatt
warmgewalzt, TM-behandelt hoch- u. verschleißfest kaltumformbar schweißbar Warmbreitband Spaltband	MS-W 1000 MS-W 1200	1.0964 1.0965	Dezember 1999

Geltungsbereich-Begriff

Die Martensitphasenstähle zählen zu der Gruppe der Mehrphasenstähle. Dieses Werkstoffblatt gilt für hochfeste Warmbandstähle, die im thermomechanisch behandelten Zustand Mindestzugfestigkeiten zwischen 1000 und 1200 MPa aufweisen. Aufgrund ihrer ausgewählten chemischen Zusammensetzung und der aufeinander abgestimmten Gefügeanteile von Ferrit und Martensit werden bei hoher Festigkeit und Verschleißfestigkeit gute Kaltumform- und Schweißeigenschaften erreicht. Lieferbar sind Warmbreitband in Dicken von 1,5 bis 3,5 mm und daraus geschnittenes Spaltband in Dicken von 1,5 bis 3,0 mm. Für Erzeugnisformen < 3,5 mm Dicke sind besondere Vereinbarungen zu treffen.

Anwendung

Die Stähle sind besonders vorgesehen für die gewichtssparende Herstellung von kaltumgeformten Bauteilen im Fahrzeugbau wie z. B. Türaufprallträger und Karosserieverstärkungen sowie für verschleißbeanspruchte Teile wie z. B. in Transportfahrzeugen und landwirtschaftlichen Geräten.


Die gesamte Umform- und Anwendungstechnik ist von grundlegender Bedeutung für das Verarbeitungsverhalten bei der Herstellung von Bauteilen aus diesen Stählen sowie für ihre Gebrauchseigenschaften. Der Verarbeiter muß sich davon überzeugen, daß seine Berechnungs-, Konstruktions- und Arbeitsverfahren werkstoffgerecht sind, dem Stand der Technik entsprechen und sich für den vorgesehenen Verwendungszweck eignen. Die Auswahl des Werkstoffes obliegt dem Besteller.

Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse in %)

Stahlsorte	C	Mn	Si	P	S ¹⁾
MS-W 1000	≤ 0,18	≤ 2,0	≤ 1,0	≤ 0,020	≤ 0,010
MS-W 1200					

¹⁾ Zur Erzielung einer guten Kaltumformbarkeit wird ein besonders niedriger S-Gehalt eingestellt und / oder durch Zusatz von Legierungselementen eine günstige Sulfidausbildung bewirkt.

MS-W-Stähle sind vollberuhigte Feinkornbaustähle, der Al-Gehalt beträgt mindestens 0,015 %. Zur Stickstoffabbinding können nach Wahl des Herstellers Ti und B einzeln oder in Kombination zugesetzt werden. Zulässige Abweichung der Stückanalyse von den Grenzwerten der Schmelzanalyse entsprechend Tafel 2 des SEW 097.

	ThyssenKrupp Stahl
---	---------------------------

Seite 1 von 3



Martensitphasen-Stahl Warmband	Stahlbezeichnung	Werkstoff-Nr.	Werkstoffdatenblatt	
	MS-W 1000 MS-W 1200	<i>Achtung: Ausdrucke / Kopien unterliegen nicht dem Änderungsdienst, es gilt grundsätzlich die Intranet-Version.</i>	- vorläufig - Intranet-Version 1.0 (25.01.2000)	

Lieferzustand

Thermomechanisch umgeformt entsprechend SEW 082, gebeiztes und geöltes, unbesäumtes oder besäumtes Warmbreitband sowie daraus geschnittenes Spaltband und Feinblech in Dicken > 1,5 - 3,5 mm, elektrolytisch verzinkt bis 2,0 mm Dicke auf Anfrage ; feuerverzinkt, andere Dicken und Ausführungsarten auf besondere Vereinbarung.

Mechanische Eigenschaften (bei Raumtemperatur)

Stahlsorte	Mindest-streckgrenze Rp0,2 MPa	Zugfestigkeit Rm MPa	Mindestbruchdehnung	
			A80 %	A5 %
MS-W 1000	750	1000 - 1250	5	8
MS-W 1200	900	1200 - 1450	5	8

Der Zugversuch wird nach EN 10002 an Querproben durchgeführt.


Prüfumfang und -bescheinigung

Wenn bei der Bestellung nicht anders vereinbart, gilt für die Ablieferungsprüfung ein Zugversuch bei jedem 2. beteiligten Warmbandcoil einer Lieferung. Darüber hinausgehende Prüfungen sowie Prüfbescheinigungen nach EN 10204 bedürfen besonderen Vereinbarungen bei der Bestellung.

Lieferbare Abmessungen

MS-W 1000 / 1200	
Dicke (mm)	Breite (mm)
1,50 - 1,59	≤ 1000
1,60 - 1,74	≤ 1100
1,75 - 1,89	≤ 1200
1,90 - 2,09	≤ 1300
2,10 - 2,29	≤ 1350
2,30 - 3,50	≤ 1400

Spaltband in Breiten ≥ 115 mm. / Andere Abmessungen auf Anfrage.



ThyssenKrupp Stahl

Seite 2 von 3



Martensitphasen-Stahl Warmband	Stahlbezeichnung	Werkstoff-Nr.	Werkstoffdatenblatt
	MS-W 1000 MS-W 1200	Achtung: Ausdrucke / Kopien unterliegen nicht dem Änderungsdienst, es gilt grundsätzlich die Intranet-Version.	- vorläufig - Intranet-Version 1.0 (25.01.2000)
Bake-Hardening Nach einer Bake-Hardening Behandlung bei einer Temperatur von 170° C und einer Haltezeit von 20 Minuten werden BH _Z -Werte > 40 MPa, im Mittel 70 MPa erreicht. Hinweise für die Verarbeitung Im Hinblick auf den Verwendungszweck ist es die Aufgabe des Bestellers, die Beanspruchungsverhältnisse wie statische oder dynamische Belastung, eine mögliche Korrosion oder Wärmebehandlung des Bauteils zu berücksichtigen. Für Warmumformungen und Warmrichtvorgänge sind diese Stähle wegen möglicher Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften nicht zu empfehlen. Die Stähle können trotz ihrer hohen Festigkeit im allgemeinen gut kalt umgeformt werden. Dabei zeichnen sich diese Stähle durch starke Verfestigungen bereits bei geringen Verformungsbeträgen aus. Durch dieses gute Verfestigungsverhalten wird das Rückfederungsverhalten günstig beeinflusst. Beim Kaltzuschneiden oder Autogenbrennen ist mit einer Verfestigung bzw. Aufhärtung der Schnitt- oder Brennkante zu rechnen. Werden diese anschließend kalt verformt, so kann ein Spannungsarmglühen, ein Abarbeiten oder ein Brechen der Kanten im Bereich der Biegezone erforderlich sein. Die Stähle sind nach allen üblichen Verfahren schweißbar und können nach allen üblichen Schneidverfahren (z. B. Laserschneiden) thermisch getrennt werden. Üblicherweise ist kein Vorwärmen erforderlich. Für das Schweißen ist sinngemäß die gültige Ausgabe des SEW 088 zu beachten. Für zusätzliche, über die Angaben des Werkstoffblattes hinausgehende Auskünfte und Beratung stehen dem Besteller die TKS-Werkstoffsachverständigen zur Verfügung.			
 ThyssenKrupp Stahl Seite 3 von 3			



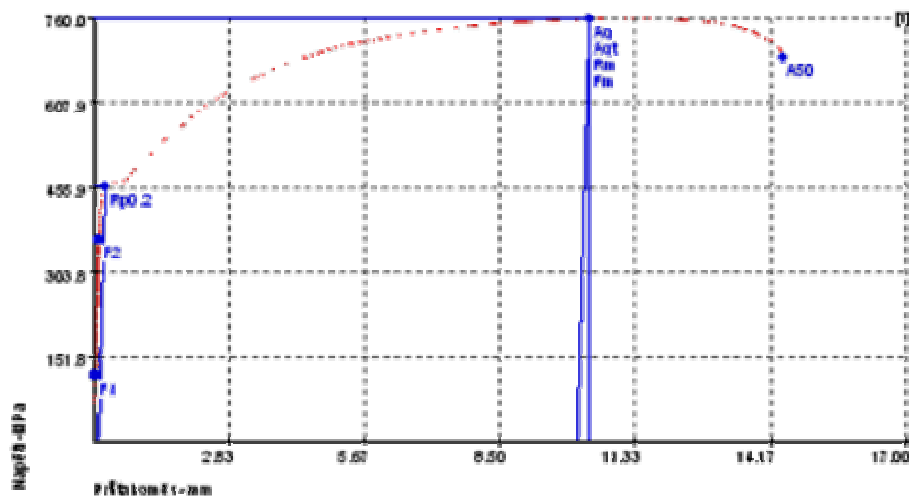
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál : RAK 40/70 Zkouška provedena dle : EN 10002
Plocha průřezu vzorku : 11,96 x 1,5 Vypracoval : Stanislav Šimáček
Směr odebrání vzorku : 0° Datum testu : 11.04.2006
Typ vzorku : _____
Rychlost posuvu : 10 mm/min.

Výstupní hodnoty

Zkouška	R_m MPa	$R_{p0.2}$ MPa	A50 %
1	766,70	457,26	26,36
2	759,93	460,47	26,03
3	763,71	457,99	27,26
4	759,97	464,66	27,91
5	759,26	457,60	26,36
6	762,91	458,04	26,27
7	764,96	455,58	26,07
8	763,72	459,26	26,39
9	764,29	459,60	26,39
10	760,83	458,94	27,09
11	3,08	2,58	0,71



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení měření a materiálů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 35 337 4, +420 605 957 404



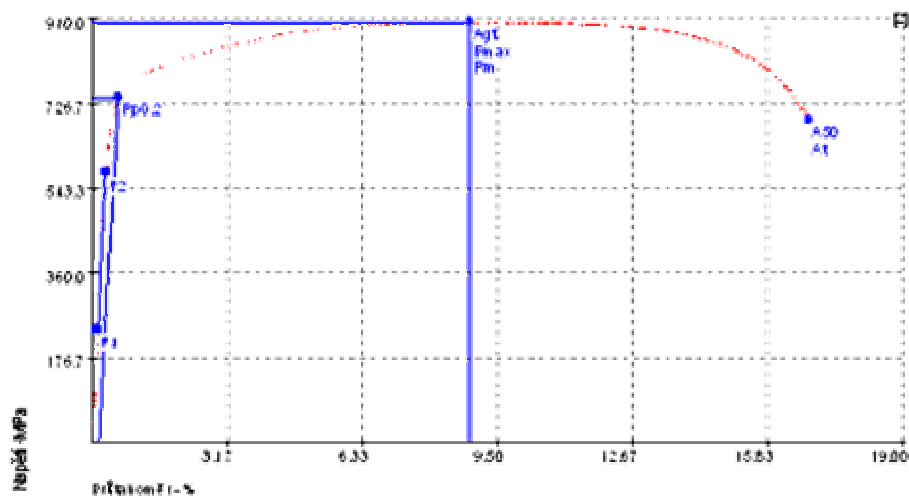
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál: CPW-800 Zkouška provedena dle: EN 10002
Plocha průřezu vzorku: 14,65x2,05 Vypracoval: Stanislav Šimáček
Směr odebrání vzorku: 0° Datum testu: 11.04.2006
Typ vzorku: _____
Rychlost posuvu: 10 mm/min.

Výstupní hodnoty

Zkouška	R _m MPa	R _{p0.2} MPa	A ₅₀ %
1	893.94	741.29	14.51
2	905.69	741.81	16.33
3	907.14	765.49	15.52
4	897.01	742.83	15.47
5	906.71	761.20	15.39
6	895.18	740.77	14.55
7	887.32	746.27	16.05
8	905.47	761.70	15.32
x	899.90	750.05	15.39
s	7.44	10.72	0.84



Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

Oddělení měření kovů a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 353374, +420 805057404



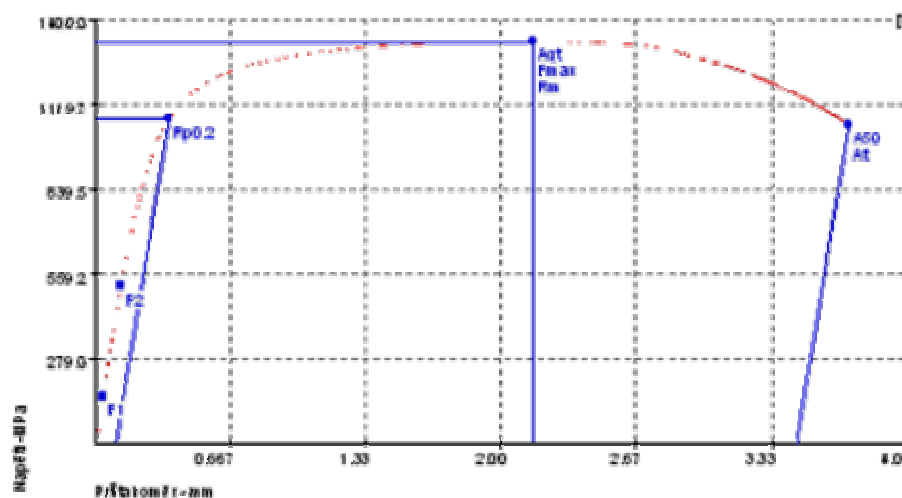
Statická zkouška tahem

Vstupní hodnoty

Testovaný materiál : MS-W 1200 Zkouška provedena dle : EN 10002
Plocha průřezu vzorku : 18,59x1,85mm Vypracoval : Stanislav Šimáček
Směr odebrání vzorku : 0° Datum testu : 11.04.2006
Typ vzorku :
Rychlost posuvu : 10 mm / min.

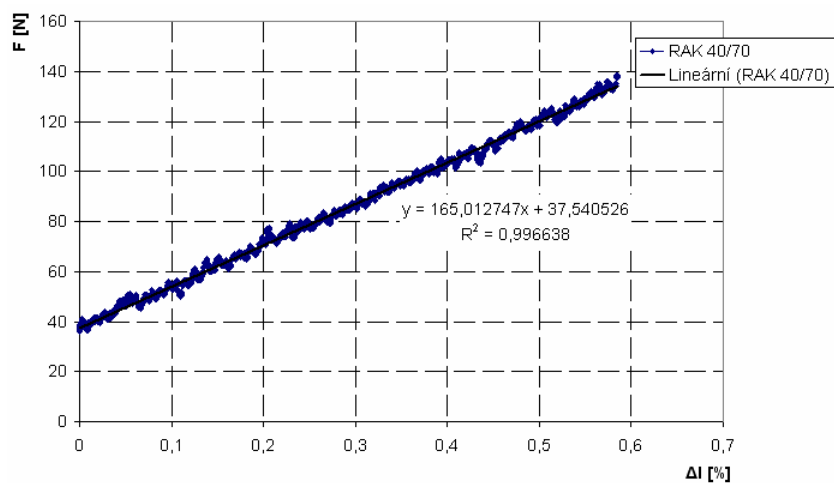
Výstupní hodnoty

Zkouška	R_m MPa	$R_{p0.2}$ MPa	ASD %
1	1329,65	1073,89	6,89
2	1330,96	1065,84	7,48
3	1336,69	1077,96	6,02
4	1329,51	1072,36	5,91
5	1323,56	1063,89	8,49
6	1328,93	1076,36	6,96
7	1330,27	1066,92	6,60
8	1329,80	1069,56	6,91
9	3,56	7,57	0,88

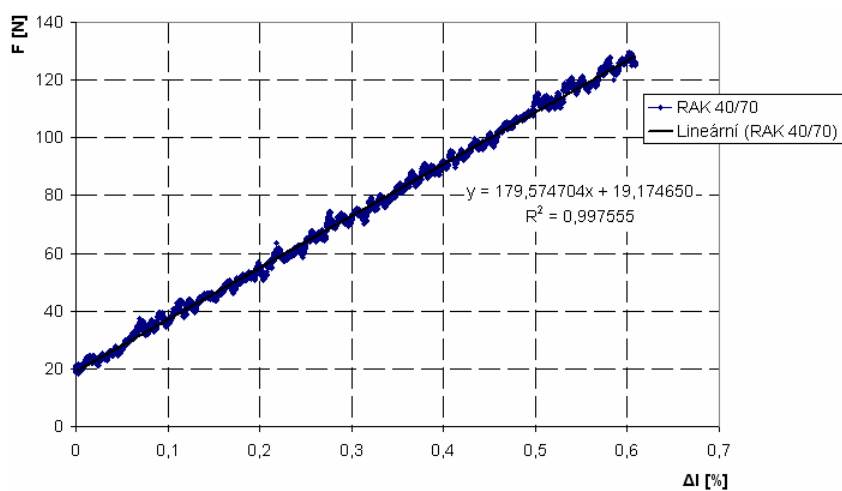


Technická univerzita v Liberci FS
Katedra strojírenské technologie

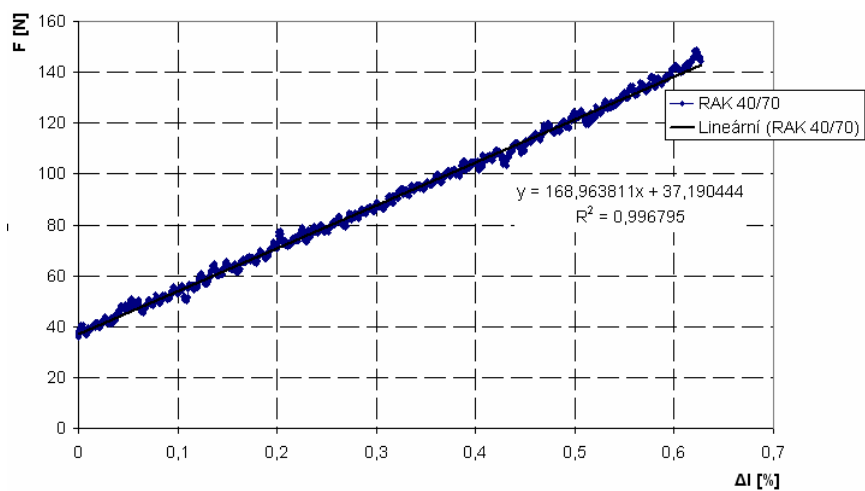
Oddělení tvářecích a plastů
Hájkova 6, 461 17 Liberec 1
Tel.: +420 485 363374, +420 606967404

RA-K 40/70

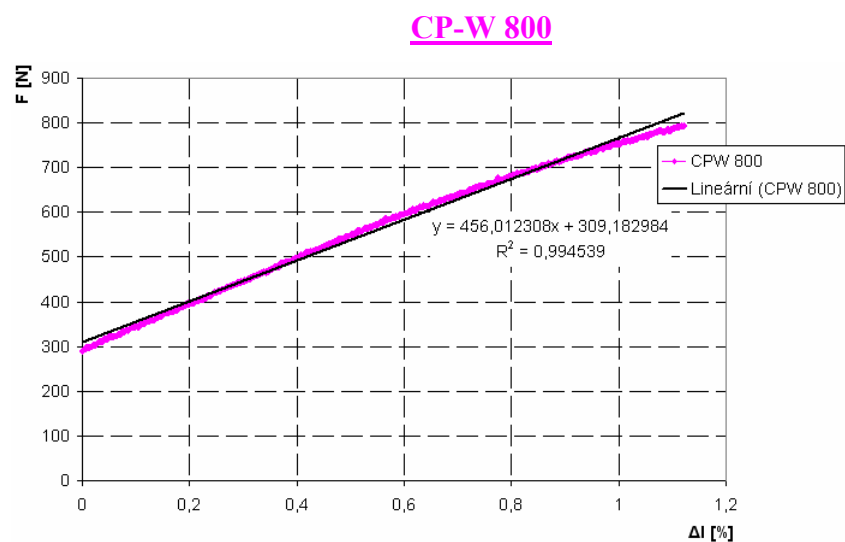
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.1



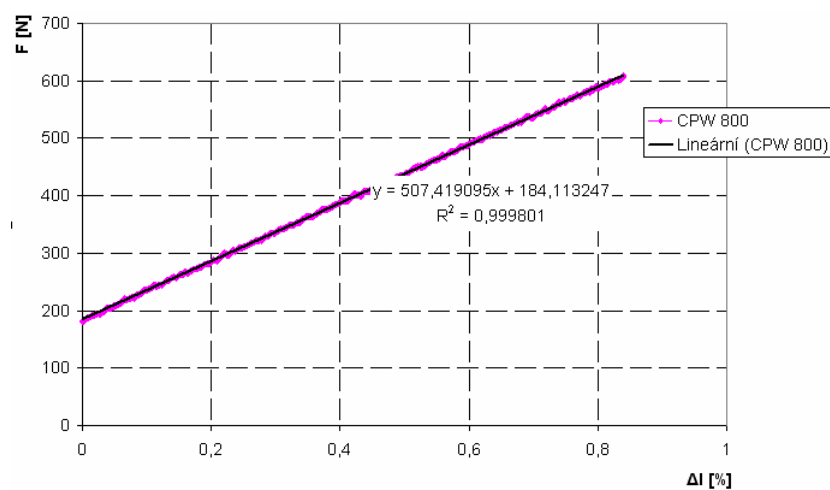
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.2



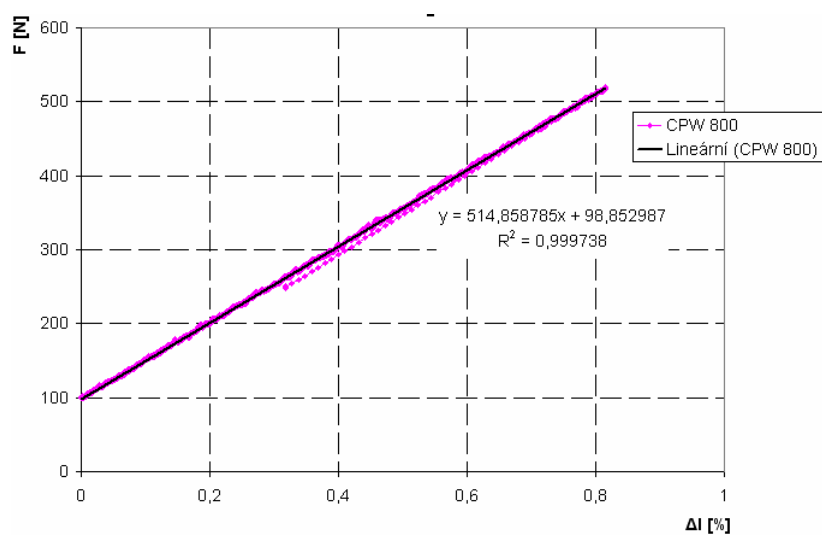
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.3



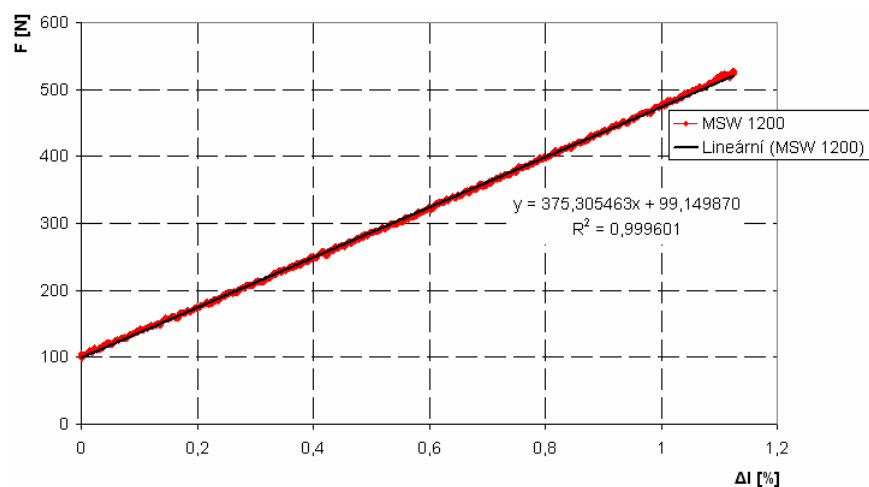
Obr. CP-W 800 – vzorek č.1



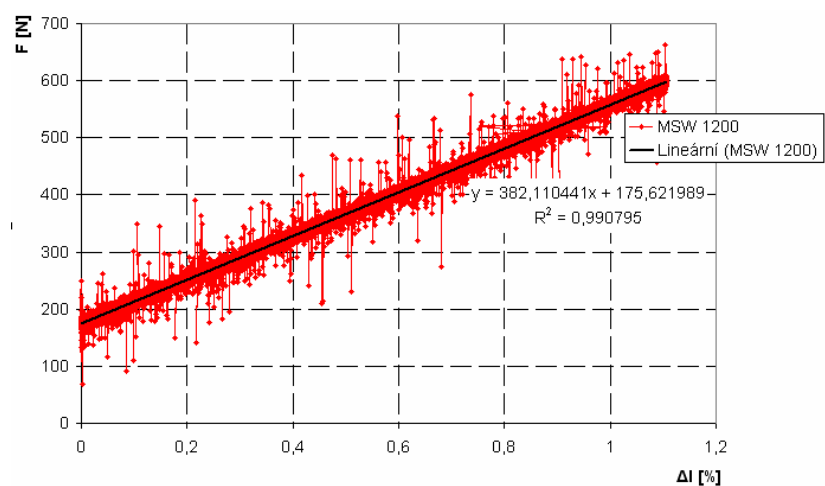
Obr. CP-W 800 – vzorek č.2



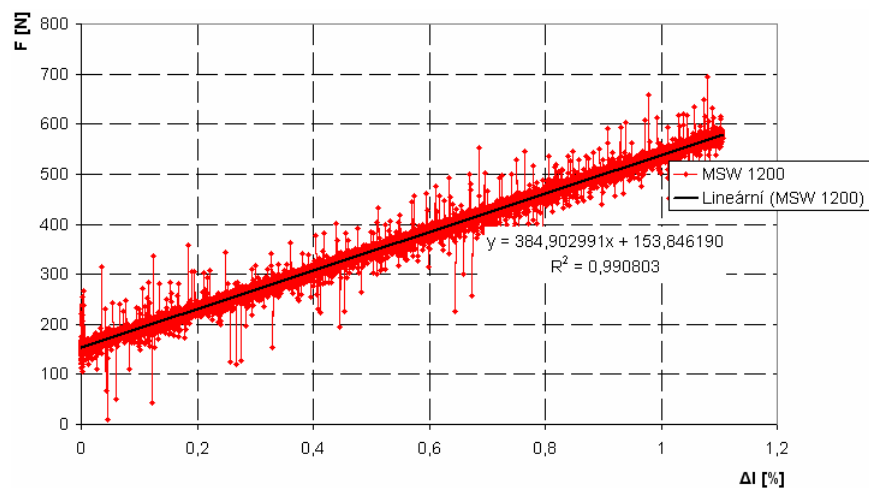
Obr. CP-W 800 – vzorek č.3

MS-W 1200

Obr. MS-W 1200 – vzorek č.1

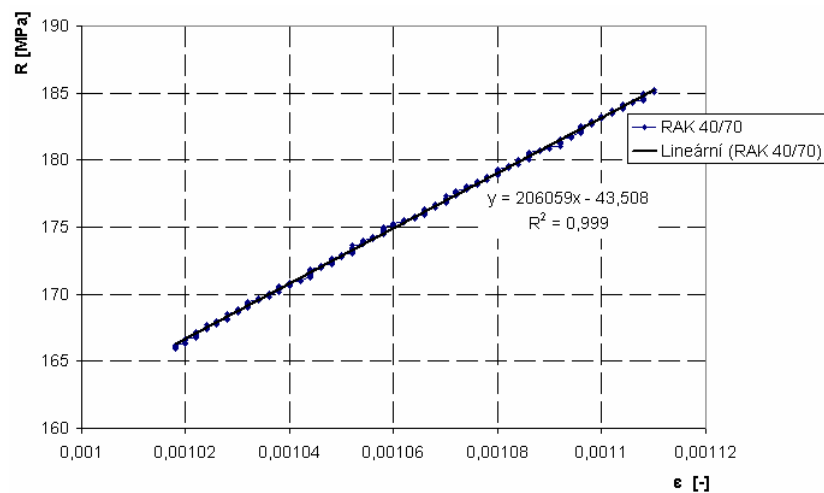


Obr. MS-W 1200 – vzorek č.2

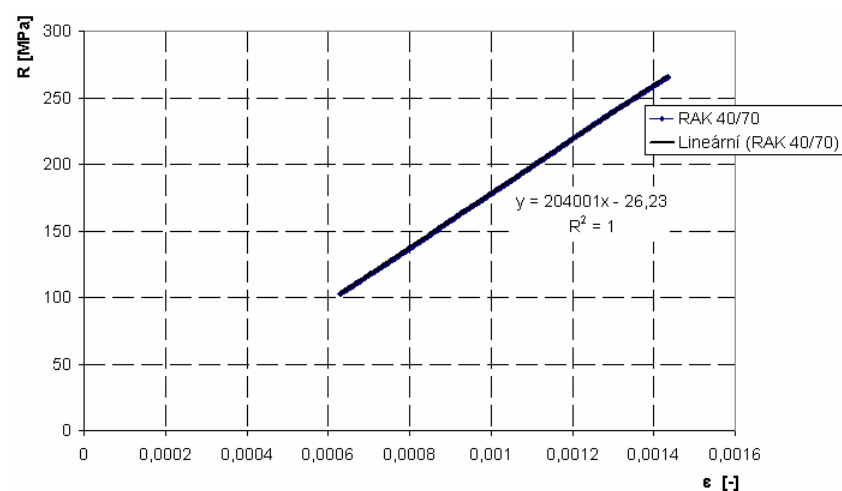


Obr. MS-W 1200 – vzorek č.3

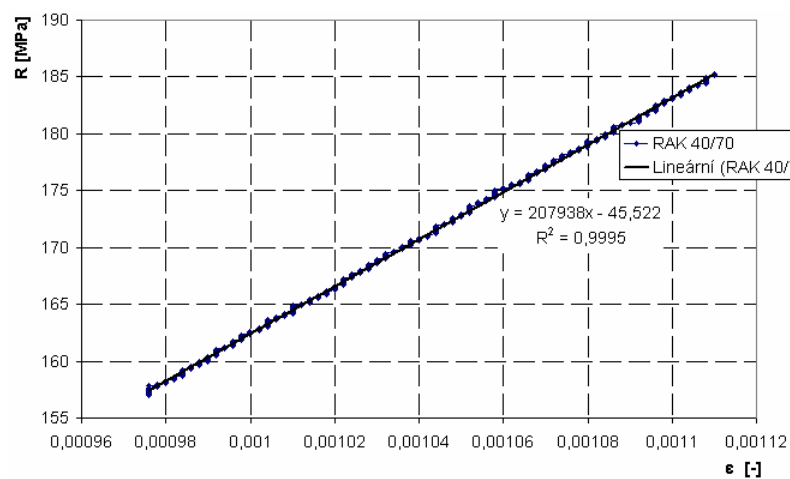
RAK- 40/70



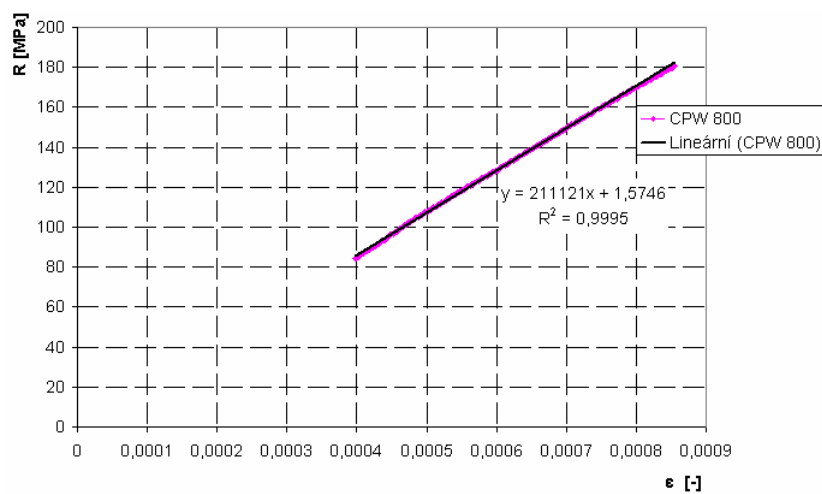
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.1



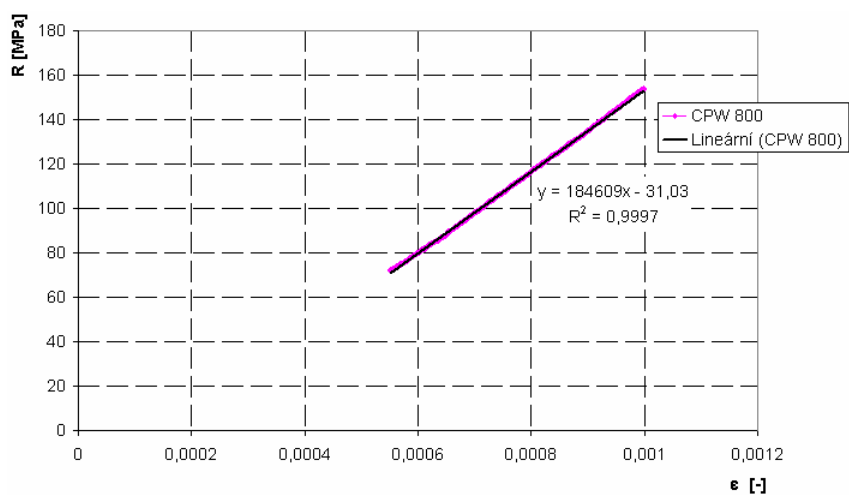
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.2



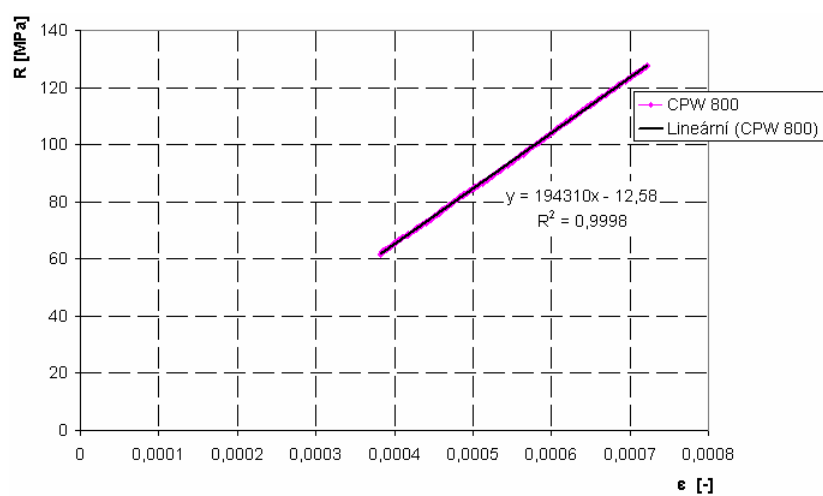
Obr. RA-K 40/70 – vzorek č.3

CP-W 800

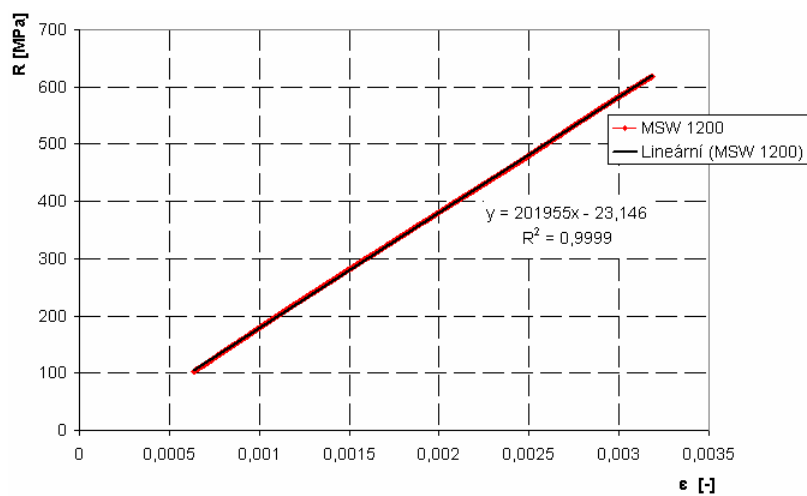
Obr. CP-W 800 – vzorek č.1



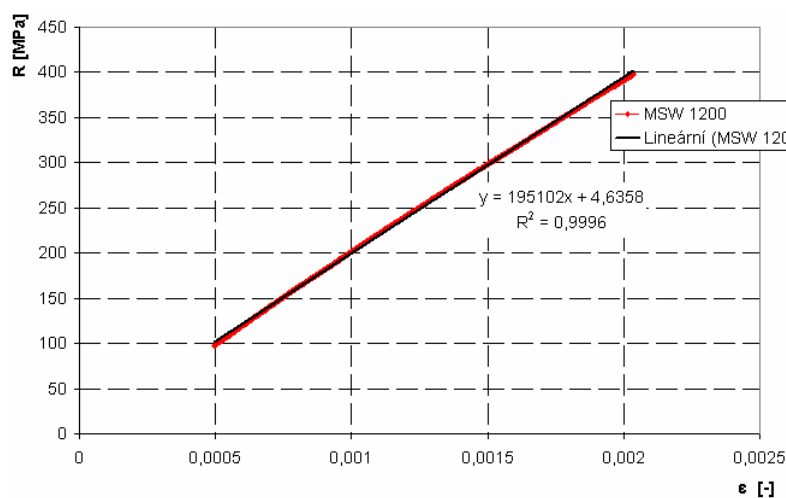
Obr. CP-W 800 – vzorek č.2



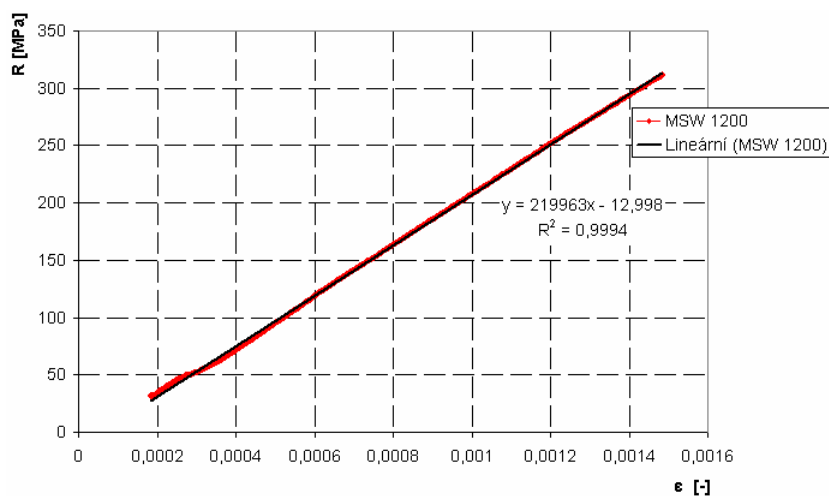
Obr. CP-W 800 – vzorek č.3

**MS-W 1200**

Obr. MS-W 1200 – vzorek č.1



Obr. MS-W 1200 – vzorek č.2



Obr. MS-W 1200 – vzorek č.3

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 26.5.2006

Podpis:

Declaration

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 26.5.2006

Signature: